



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

KATHLEEN DALL BELLO DE SOUZA RISSON

**PROPOSTA DE PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM DE
CORPOS DE PROVA EM LABORATÓRIO PARA
CONCRETOS PERMEÁVEIS**

KATHLEEN DALL BELLO DE SOUZA RISSON

**PROPOSTA DE PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM DE
CORPOS DE PROVA EM LABORATÓRIO PARA
CONCRETOS PERMEÁVEIS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Berenice Martins
Toralles

Co-orientador: Prof. Dr. André Campos de
Moura

Londrina
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Risson, Kathleen Dall Bello de Souza.

Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis / Kathleen Dall Bello de Souza Risson. - Londrina, 2017.
190 f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Coorientador: André Campos de Moura.

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Concreto permeável - Tese. 2. Compactação - Tese. 3. Agregado graúdo - Tese. 4. Procedimento de moldagem - Tese. I. Martins Toralles, Berenice. II. Campos de Moura, André. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. IV. Título.

KATHLEEN DALL BELLO DE SOUZA RISSON

**PROPOSTA DE UM PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM DE CORPOS
DE PROVA EM LABORATÓRIO PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção ao título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Berenice Martins
Toralles
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof^a. Dr^a. Angela Borges Masuero
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
– UFRGS

Prof^a. Dr^a. Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino-
Americana- UNILA

Londrina, 19 de maio de 2017.

Dedico este trabalho ao meu esposo
Adriano e a nossa filha Maria Luiza.

AGRADECIMENTOS

À Deus acima de tudo.

À toda a família Dall Bello e Vieira Risson pela compreensão e pelo incentivo, em especial a minha mãe Elisabete, exemplo de superação e perseverança.

Ao meu amado esposo Adriano por todo seu apoio e compreensão. Obrigada por estar ao meu lado!

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Berenice Martins Toralles, pela oportunidade, pela confiança, e acima de tudo por acreditar no meu potencial. Agradeço pelo auxílio e incentivo no decorrer dos estudos, pela paciência e pelo exemplo de pessoa e educadora.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. André de Moura pela disponibilidade constante e pelo exemplo de serenidade ao transmitir seu conhecimento.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento (ENGES) da UEL, em especial a Prof^a. Dr^a. Vanderli Marino Melem pelo auxílio nas análises estatísticas.

Às minhas amigas Gabriela Vieira Silva, Thais Lemos e Áurea Fabrícia Amancio Quirino, pelo acolhimento em Londrina/PR.

Aos companheiros de mestrado que contribuíram de alguma forma para a realização deste mestrado: Tatiana Vettori, Thaís Ferrari Réus, Gerson Fernando Barreto Sandoval e aos amigos da pós-graduação, pelo carinho e hospitalidade.

Ao Instituto Federal do Paraná – IFPR – Campus Foz do Iguaçu por possibilitar a realização desse estudo e aos meus colegas de instituição pelo apoio durante esse período.

Ao Centro Universitário Dinâmica das Cataratas – UDC e à ITAIPU BINACIONAL pela disponibilidade dos laboratórios e pelo suporte técnico.

Aos queridos laboratoristas Sr. Willson, Gabriel e Jefferson pela disponibilidade e paciência dispensada no decorrer dos ensaios laboratoriais.

Aos professores Dr. Everaldo Pletz e Me. Cesar Winter de Mello, que participaram da minha formação acadêmica, e hoje contribuem com suas valiosas palavras de incentivo nessa caminhada em busca ao conhecimento.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram e intercederam junto a Deus para a realização deste trabalho.

“Existe uma força que se move, uma mão que me sustenta,
um amor que me alimenta e uma graça que me protege.
Isso não é sorte: é benção, é ter Deus na minha vida!”

Yla Fernandes

RISSON, Kathleen Dall Bello de Souza. **Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis**. 2017. 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

RESUMO

No Brasil, o pavimento permeável de concreto vem atraindo atenção de diversos pesquisadores, pois seu alto teor de vazios permite a infiltração da água pluvial e redução do escoamento superficial. Visando contribuir para o conhecimento sobre o pavimento permeável de concreto, este estudo tem como objetivo propor um procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis aplicados em pavimentos de tráfego para pedestre, conforme requisitos da NBR 16416: 2015. Para isso, o trabalho foi dividido em duas etapas. Na Etapa Exploratória estudaram-se dois métodos de compactação: Proctor de 2,5 kg e mesa de consistência, totalizando seis procedimentos de compactação. Na Etapa Final, após definição do Proctor de 2,5 kg como método de compactação, avaliou-se a influência do número de golpes nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável. Sendo o concreto produzido em massa no traço 1:3,26 (cimento: agregado graúdo), relação a/c igual a 0,31 e quatro granulometrias de agregado graúdo de rocha basáltica: brita de 19 mm descontínua, brita de 19 mm uniforme, brita de 12,5 mm descontínua e brita de 12,5 mm uniforme, foram avaliados a massa específica no estado fresco, a porcentagem de vazios, o coeficiente de permeabilidade, a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão. Diante dos resultados obtidos, propõe-se como procedimento de compactação de corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm e prismáticos de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm em laboratório: o enchimento dos moldes com controle da massa do concreto e uso de chapa metálica. Verificou-se que existe uma correlação linear entre a energia de compactação e o número de golpes. Considerando os materiais, o traço e o procedimento de compactação utilizados neste estudo foi possível produzir concretos permeáveis de acordo com os requisitos da ABNT NBR 16416: 2015 para uso em pavimentos de tráfego de pedestre, com coeficientes de permeabilidade superior a 1 mm/s e resistência à tração na flexão aos 28 dias superior a 1 MPa. Por fim, na maioria das misturas avaliadas, verificou-se que a distribuição granulométrica, não exerceu influência significativa no coeficiente de permeabilidade do concreto, e que o uso da brita de 12,5 mm e de granulometria descontínua, produziu concretos com massas específicas e resistências à compressão e tração na flexão mais elevadas, e porcentagem de vazios menores, quando comparados aos concretos com agregado uniforme e brita de 19 mm. O número de golpes aplicados durante o procedimento de compactação exerceu influência na massa específica, porcentagem de vazios, coeficiente de permeabilidade e resistência à compressão dos concretos permeáveis, de modo que, com o aumento do número de golpes, maiores foram as massas específicas e resistência à compressão e menor a porcentagem de vazios e coeficiente de permeabilidade dos mesmos.

Palavras-chave: Concreto Permeável. Compactação. Agregado graúdo. Procedimento de moldagem.

RISSON, Kathleen Dall Bello de Souza. **Propose of procedure of specimens molding in laboratory for pervious concrete.** 2017. 190f. Dissertation (Master in Engineering of Buildings and Sanitation) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

ABSTRACT

In Brazil, the pervious concrete pavement is attracting the attention of various researchers, because its high void content allows the infiltration of rainwater and reduction of surface runoff. Aiming to contribute to the knowledge about the pervious concrete pavement, this study has the goal of proposing a procedure of molding specimens in the laboratory for pervious concretes applied to pavements of pedestrian traffic, according to the requirements of NBR 16416: 2015. For this, the work has been divided into two phases. In the Exploratory Phase two compaction methods were studied: Proctor of 2.5 kg and flow table, conferring six compaction procedures. In the Final Phase, after defining the Proctor of 2.5 kg as compaction method, it was evaluated the influence of the number of strokes on the hydraulic and mechanical properties of the pervious concrete. Being the concrete produced in large scale in trace 1: 3.26 (cement: coarse aggregate), ratio a/c equal to 0.31, and four granulometries of coarse aggregate of basaltic rock: 19 mm discontinuous gravel large aggregate, 19 mm uniform gravel large aggregate, 12,5 mm discontinuous gravel large aggregate and 12,5 mm uniform gravel large aggregate, they were evaluated in the specific mass in the fresh state, the percentage of voids, the permeability coefficient, the compressive strength and the tensile strength in the flexural. In view of the obtained results, it is proposed as a compaction procedure of cylindrical test bodies of dimensions 100 x 200 mm and prismatic of dimensions 100 mm x 100 mm x 400 mm in the laboratory: the filling of the molds with control of the concrete mass and use of sheet metal. It has been found that there is a linear correlation between a compaction energy and the number of blows, and thus, to estimate the properties of the permeable concrete in the laboratory, the number of blows can be used. Considering the materials, the trace and the compaction procedure used in this study, it was possible to produce permeable concretes according to the requirements of ABNT NBR 16416: 2015 for use in pedestrian traffic pavements with permeability coefficients greater than 1 mm / s and tensile strength in flexion at 28 days superior than 1 MPa. Lastly, in the majority of the mixtures evaluated, it was verified that the granulometric distribution did not exert a significant influence on the permeability coefficient of the concrete, and that the use of 12,5 mm gravel large aggregate and of discontinuous granulometry produced concretes with specific masses and higher compressive strength and tensile strength in flexural, and lower voids percentage when compared to concretes with uniform aggregate and 19 mm gravel large aggregate. The number of strokes applied during the compacting procedure exerted influence on the specific mass, percentage of voids, permeability coefficient and compressive strength of the pervious concretes, so that, with the increase in the number of strokes, bigger were the specific masses and the compression strength and lower the percentage of voids and their permeability coefficient.

Keywords: Pervious concrete. Compaction. Coarse aggregate. Molding procedure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Concreto permeável com: a) pouca água; b) excesso de água; c) quantidade suficiente de água.	30
Figura 2-	Correlação linear entre a porcentagem de vazios e a massa específica no estado endurecido.....	32
Figura 3-	Correlação entre a massa específica e a porcentagem de vazios para concretos compactados por dois procedimentos de compactação.....	33
Figura 4-	Comparação entre o concreto convencional e o concreto permeável.	34
Figura 5-	Medição dos vazios no concreto permeável baseado no princípio de Arquimedes: a) pesagem da amostra em condição SSS; b) pesagem submersa da amostra em condição SSS.	35
Figura 6-	Medição dos vazios pelo método volumétrico: a) corpo de prova; b) corpo de prova envolto em filme plástico e fita adesiva; c) corpo de prova dentro do molde metálico; d) pesagem do corpo de prova com água dentro do molde metálico.....	36
Figura 7-	Efeito da dimensão máxima do agregado, látex, areia e fibra no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.	37
Figura 8-	Efeito do tamanho do agregado sobre o coeficiente de permeabilidade à água do concreto permeável.	38
Figura 9-	Esquema do ensaio de carga constante.	39
Figura 10-	Efeito da dimensão máxima característica do agregado, látex, areia e fibra na resistência à compressão do concreto permeável.	41
Figura 11-	Efeito do tamanho do agregado sobre a resistência à compressão do concreto permeável.	42
Figura 12-	Correlação entre a resistência à compressão, o coeficiente de permeabilidade e porcentagem de vazios.....	43
Figura 13-	Relação entre a resistência à tração na flexão e porcentagem de vazios.	44

Figura 14-	Efeito do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para diferentes relações água/cimento.	45
Figura 15-	Influência da adição de agregado miúdo na resistência à tração na flexão.....	45
Figura 16-	Efeito dos aditivos na resistência à tração na flexão aos 28 dias do concreto permeável.....	46
Figura 17-	Influência da adição de fibras na resistência à tração na flexão aos 28 dias em concretos permeáveis.....	47
Figura 18-	Massa específica do concreto permeável para oito métodos de compactação em laboratório e duas relações a/c.	48
Figura 19-	Influência da energia de compactação na massa específica de diferentes traços em massa de concreto permeável.....	49
Figura 20-	Influência da energia de compactação: a) resistência à compressão; b) coeficiente de permeabilidade.	50
Figura 21-	Efeito da vibração nas propriedades do concreto permeável.....	52
Figura 22-	Seção transversal dos corpos de prova compactados em laboratório.	55
Figura 23-	Arranjo dos agregados graúdos: a) testemunhos extraídos de placas; b) corpo de prova compactado em laboratório.	55
Figura 24-	Efeito do método de compactação na porcentagem de vazios do concreto permeável: a) $D_{m\acute{a}x}=9,54$ mm; b) $D_{m\acute{a}x}=6,35$ mm.	57
Figura 25-	Efeito do método de compactação na resistência à compressão do concreto permeável a) $D_{m\acute{a}x}=9,54$ mm; b) $D_{m\acute{a}x}=6,35$ mm.	58
Figura 26-	Estratégia de pesquisa.....	60
Figura 27-	Curva granulométrica do agregado graúdo.....	61
Figura 28-	Controle do concreto permeável produzido: a) teste Visual; b) ensaio de abatimento.....	65
Figura 29-	Nomenclatura adotada para identificar os procedimentos de compactação da Etapa Exploratória.....	66
Figura 30-	Compactação dos corpos de prova com uso: a) da mesa de consistência; b) do cilindro de Proctor de massa 2,5 kg.	67
Figura 31-	Medição dos vazios: a) Pesagem do corpo de prova em condição SSS; b) Pesagem hidrostática do corpo de prova; c) Corpo de prova submerso.....	70

Figura 32-	Medição dos vazios: a) vedação do corpo de prova com filme plástico; b) pesagem do corpo de prova; c) preenchimento dos vazios com água e pesagem do conjunto; d) água aflorando na superfície superior do corpo de prova.....	70
Figura 33-	Preparação dos corpos de prova para ensaio de permeabilidade: a) colocação do filme plástico; b) corte do excesso do plástico filme; c) passagem de fita adesiva transparente; d) colocação do corpo de prova entre as luvas de PVC.....	71
Figura 34-	Ensaio no permeômetro de carga constante.....	72
Figura 35-	Curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados na Etapa Final.....	75
Figura 36-	Procedimentos de moldagem dos corpos de prova cilíndricos: a) moldagem em volume; b) moldagem em massa.....	78
Figura 37-	Procedimento de moldagem em volume dos corpos de prova cilíndricos: a) enchimento do molde; b) compactação; c) rasamento; d) corpo de prova no molde pronto para ensaio de massa específica.	79
Figura 38-	Procedimento de moldagem em massa dos corpos de prova cilíndricos: a) enchimento do molde; b) controle da massa de concreto; c) colocação da chapa circular sobre o concreto; d) compactação com o cilindro de Proctor; e) medição da altura do concreto compactado para cálculo da energia de compactação.....	80
Figura 39-	Ensaio de massa específica no estado fresco dos corpos de prova cilíndricos: a) retirada dos moldes; b) rasamento do concreto com colher de pedreiro; c) corpo de prova rasado; d) pesagem do concreto.....	81
Figura 40-	Procedimentos de compactação dos corpos de prismáticos com aplicação dos golpes de Proctor na chapa metálica de modo: a) distribuído; b) centrado.....	82
Figura 41-	Chapa metálica, colar e molde utilizados para a moldagem dos corpos de prova prismáticos.	83

Figura 42-	Compactação dos corpos de prova prismático com aplicação dos golpes de modo distribuído na chapa metálica: a) primeiro golpe; b) segundo golpe; c) terceiro golpe; d) quarto golpe	83
Figura 43-	Medição da altura final do concreto permeável após compactação para cálculo da energia de compactação.....	84
Figura 44-	Compactação dos corpos de prova prismático com aplicação dos golpes no centro da chapa metálica.....	84
Figura 45-	Procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova cilíndricos na Etapa Final.....	85
Figura 46-	Procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova prismáticos na Etapa Final.....	86
Figura 47-	Nomenclatura para os concretos permeáveis da Etapa Final.....	87
Figura 48-	Medição dos corpos de prova com paquímetro digital	88
Figura 49-	Preparação do corpo de prova para o ensaio de permeabilidade: a) passagem do plástico filme; b) corpos de prova encapados; c) corte do excesso do plástico; d) passagem da fita adesiva transparente; e) passagem da fita adesiva transparente na superfície superior.....	90
Figura 50-	Permeâmetro a carga constante utilizado na Etapa Final: a) aplicação do silicone; b) realização do ensaio.....	91
Figura 51-	Ensaio de resistência à tração na flexão: a) amostra sendo ensaiada; b) ruptura da amostra.....	92
Figura 52-	Exemplos de discontinuidades no corpo de prova adensado pelo procedimento P5.n-1.....	95
Figura 53-	Comparativo entre a massa específica média no estado fresco e endurecido dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.....	97
Figura 54-	Comparativo entre a porcentagem de vazios pelos métodos de Batezini e Sandoval dos concretos permeáveis da Etapa Exploratória.....	99
Figura 55-	Influência do procedimento de compactação no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável na Etapa Exploratória.....	101

Figura 56-	Influência do procedimento de compactação na resistência à compressão média aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.....	102
Figura 57-	Influência do procedimento de compactação na resistência à tração por compressão diametral média aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.....	103
Figura 58-	Correlação entre a porcentagem média de vazios e a massa específica média no estado endurecido.....	104
Figura 59-	Correlação entre a resistência à compressão, porcentagens de vazios e coeficiente de permeabilidade.....	105
Figura 60-	Correlação entre massa específica do concreto no estado fresco e número de golpes obtidos durante o procedimento de compactação com preenchimento do molde cilíndrico em volume.....	108
Figura 61-	Correlação entre massa específica do concreto no estado fresco e número de golpes obtidos durante o procedimento de compactação com preenchimento do molde cilíndrico em massa.....	111
Figura 62-	Correlação entre massa específica do concreto permeável no estado fresco e número de golpes obtidos em corpos de prova prismáticos durante o procedimento de compactação com aplicação dos golpes distribuídos na chapa metálica.....	112
Figura 63-	Correlação entre massa específica do concreto permeável no estado fresco e número de golpes obtidos em corpos de prova prismáticos durante o procedimento de compactação com aplicação dos golpes centrados na chapa metálica.....	114
Figura 64-	Influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto permeável no estado fresco produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova cilíndricos.....	117
Figura 65-	Influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto permeável no estado fresco produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova prismático.....	119

Figura 66-	Influência do procedimento de compactação na energia de compactação dos concretos moldados em corpos de prova cilíndrico	122
Figura 67-	Correlação entre energia de compactação de concretos permeáveis com quatro granulometrias de agregado graúdo e o número de golpes aplicados com Proctor de 2,5 em corpos de prova prismáticos.	123
Figura 68-	Influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova cilíndricos.	125
Figura 69-	Influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova prismáticos.	129
Figura 70-	Influência do procedimento de compactação no coeficiente de permeabilidade produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.	131
Figura 71-	Influência do procedimento de compactação na resistência à compressão média aos 28 dias dos concretos permeáveis produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.	133
Figura 72-	Influência do procedimento de compactação na resistência à tração flexão média aos 28 dias dos concretos permeáveis produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.	135
Figura 73-	Correlação entre a massa específica média no estado fresco e porcentagem média de vazios em corpos de prova de concreto permeável.	137
Figura 74-	Correlação entre o coeficiente de permeabilidade, a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade em corpos de prova de concreto permeável.	138
Figura 75-	Correlação entre a porcentagem de vazios e a resistência à tração na flexão em corpos de prova de concreto permeável.	139

Figura 76- Correlação entre a resistência à tração na flexão e massa específica no estado fresco em corpos de prova de concreto permeável.	140
---	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-	Proporções típicas de materiais utilizados no concreto permeável.	28
Quadro 2-	Correspondência aproximada entre cimentos nacionais e americanos.....	29
Quadro 3-	Requisitos para pavimento de concreto permeável moldado no local.....	44
Quadro 4-	Método de compactação e identificação dos métodos.....	51
Quadro 5-	Técnicas de compactação de corpos de prova.	54
Quadro 6-	Procedimentos de compactação de corpos de prova cilíndricos.....	56
Quadro 7-	Procedimentos de compactação na Etapa Exploratória.....	66
Quadro 8-	Planejamento experimental da Etapa Exploratória.	68
Quadro 9-	Identificação dos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final.	87
Quadro 10-	Planejamento experimental para a Etapa Final.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Resistência à compressão do concreto para diferentes relações água/cimento e método de compactação.....	48
Tabela 2-	Propriedades hidráulicas dos concretos permeáveis com diferentes graduações de agregado graúdo e procedimento de compactação.....	51
Tabela 3-	Propriedades do concreto permeável.....	53
Tabela 4-	Composição granulométrica do agregado graúdo na Etapa Exploratória.....	62
Tabela 5-	Ensaio de caracterização realizados no agregado graúdo da Etapa Exploratória.....	63
Tabela 6-	Características físicas e químicas do CP II-Z-32 da Etapa Exploratória.....	64
Tabela 7-	Composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados na Etapa Final.....	74
Tabela 8-	Caracterização dos agregados graúdos da Etapa Final.....	75
Tabela 9-	Características físicas e químicas do CP II-Z-32 utilizado na Etapa Final.....	76
Tabela 10-	Massa específica no estado fresco dos corpos de prova cilíndrico na Etapa Exploratória.....	95
Tabela 11-	Massa específica no estado endurecido dos corpos de prova cilíndrico na Etapa Exploratória.....	96
Tabela 12-	Porcentagem de vazios dos concretos permeáveis avaliados pelo método utilizado por Batezini (2013) na Etapa Exploratória.....	98
Tabela 13-	Porcentagem de vazios dos concretos permeáveis avaliados pelo método utilizado por Sandoval (2014) na Etapa Exploratória.....	99
Tabela 14-	Coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis.....	100
Tabela 15-	Resistência à compressão aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.....	102
Tabela 16-	Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.....	103

Tabela 17-	Resumo da Etapa Exploratória.	106
Tabela 18-	Massa específica do concreto no estado fresco durante o procedimento de compactação com preenchimento do corpo de prova cilíndrico em volume.....	108
Tabela 19-	Massa específica do concreto no estado fresco durante o procedimento de compactação com preenchimento do corpo de prova cilíndrico em massa.....	110
Tabela 20-	Massa específica no estado fresco do concreto permeável de corpos de prova prismáticos compactados com golpes distribuídos na chapa metálica.....	112
Tabela 21-	Massa específica no estado fresco do concreto permeável de corpos de prova prismáticos compactados com golpes concentrados na chapa metálica.....	113
Tabela 22-	Massa específica média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.	116
Tabela 23-	Massa específica média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.	118
Tabela 24-	Influência do procedimento de compactação na energia de compactação.....	121
Tabela 25-	Porcentagem de vazios média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.....	124
Tabela 26-	Porosidade aberta, fechada e total média dos concretos permeáveis.....	127
Tabela 27-	Porcentagem de vazios média dos concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.	128
Tabela 28-	Coeficiente de permeabilidade para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.....	130
Tabela 29-	Resistência à compressão dos concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.....	132
Tabela 30-	Coeficiente de permeabilidade para os concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.....	134
Tabela 31-	Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.	140

Tabela 32- Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.	141
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise of Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPC	Concreto Permeável de cimento Portland sem aditivo
CP	Cimento Portland
CPAD	Concreto Permeável de cimento Portland com aditivo
CRMCA	Colorado Ready Mixed Concrete Association
$D_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima característica
EPA	United States Environmental Protection Agency
F_c	Resistência à compressão
$f_{L,D}$	Resistência à tração pro compressão diametral.
GL	Grau de Liberdade
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
ORMCA	Ohio Ready Mixed Concrete Association
PPS	Polissulfeto de Fenileno
PVC	Policloreto de polivinila
QM	Quadrados médios
RS	Resistente a sulfatos
SQ	Soma dos quadrados
SSS	Superfície Saturada Seca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA.....	25
1.3	HIPÓTESE	25
1.4	OBJETIVOS	25
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	25
1.4.2	<i>Objetivo Específico</i>	26
1.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	26
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	CONCRETO PERMÉAVEL PARA PAVIMENTOS	27
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
2.2	MATERIAIS CONSTITUINTES	28
2.2.1	<i>Cimento Portland</i>	29
2.2.2	<i>Água</i>	30
2.2.3	<i>Agregado graúdo</i>	30
2.3	PROPRIEDADES	31
2.3.1	<i>Propriedades no estado fresco</i>	32
2.3.2	<i>Propriedades Hidráulicas</i>	33
2.3.3	<i>Propriedades Mecânicas</i>	40
2.4	MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	59
3.2	ETAPA EXPLORATÓRIA.....	61
3.2.1	<i>Materiais</i>	61
3.2.2	<i>Método</i>	64
3.3	ETAPA FINAL.....	72
3.3.1	<i>Materiais</i>	73
3.3.2	<i>Método</i>	77
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	93

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
4.1	ETAPA EXPLORATÓRIA	94
4.1.1	<i>Massa específica</i>	94
4.1.2	<i>Porcentagem de vazios</i>	98
4.1.3	<i>Coeficiente de permeabilidade</i>	100
4.1.4	<i>Resistência à compressão aos 21 dias</i>	101
4.1.5	<i>Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias</i>	103
4.1.6	<i>Correlações entre as propriedades</i>	104
4.1.7	<i>Resumo da Etapa Exploratória</i>	106
4.2	ETAPA FINAL.....	107
4.2.1	<i>Moldagem e compactação</i>	107
4.2.2	<i>Avaliação dos concretos permeáveis produzidos</i>	115
4.2.3	<i>Resumo da Etapa Final</i>	140
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
5.1	CONCLUSÕES	143
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	144
	REFERÊNCIAS	146
	APÊNDICES	153
APÊNDICE 1-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO – ETAPA EXPLORATÓRIA.	154
APÊNDICE 2-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO ENDURECIDO – ETAPA EXPLORATÓRIA.	155
APÊNDICE 3-	ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE AS MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO – ETAPA EXPLORATÓRIA.	156
APÊNDICE 4 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELO MÉTODO DE BATEZINI – ETAPA EXPLORATÓRIA.....	157
APÊNDICE 5 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELO MÉTODO DE SAND – ETAPA EXPLORATÓRIA.....	158

APÊNDICE 6 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELOS MÉTODOS BATEZINI E SANDOVAL – ETAPA EXPLORATÓRIA.	159
APÊNDICE 7-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE– ETAPA EXPLORATÓRIA.....	160
APÊNDICE 8 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 21 DIAS – ETAPA EXPLORATÓRIA.....	161
APÊNDICE 9 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 21 DIAS – ETAPA EXPLORATÓRIA.....	162
APÊNDICE 10 –	REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO MOLDADO EM VOLUME.....	163
APÊNDICE 11-	REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO MOLDADO EM MASSA.	164
APÊNDICE 12-	VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO COM PREENCHIMENTO DO MOLDE CILINDRICO EM MASSA.	165
APÊNDICE 13-	REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES DISTRIBUÍDOS NA CHAPA METÁLICA.	166
APÊNDICE 14-	VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES DISTRIBUÍDOS NA CHAPA METÁLICA.....	167

APÊNDICE 15-	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES CONCENTRADOS NA CHAPA METÁLICA.	168
APÊNDICE 16-	VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES CONCENTRADO NA CHAPA METÁLICA.	169
APÊNDICE 17-	MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS.	170
APÊNDICE 18-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS MASSAS ESPECÍFICAS - ETAPA FINAL	172
APÊNDICE 19 –	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO.....	173
APÊNDICE 20-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO - ETAPA FINAL.....	174
APÊNDICE 21-	PORCENTAGEM DE VAZIOS (POROSIDADE ABERTA) DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS.....	175
APÊNDICE 22 –	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE PORCENTAGENS DE VAZIOS.....	177
APÊNDICE 23-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS - ETAPA FINAL.....	178
APÊNDICE 24-	POROSIDADE ABERTA, FECHADA E TOTAL DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.	179
APÊNDICE 25-	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.	181
APÊNDICE 26-	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE	182

APÊNDICE 27-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - ETAPA FINAL	183
APÊNDICE 28 -	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.	184
APÊNDICE 29 –	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	186
APÊNDICE 30 –	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ETAPA FINAL	187
APÊNDICE 31-	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	188
APENDICE 32 –	REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	189
APENDICE 33-	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO - ETAPA FINAL.....	190

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização caracteriza-se pelo aumento das áreas impermeáveis, causado pela construção de edificações e obras de infraestrutura viária. Associado ao sistema de drenagem que prevê a canalização das águas pluviais, ocorre um incremento da vazão e da velocidade das águas que chegam ao mesmo tempo ao sistema de drenagem. Essa sobrecarga ocasiona a perda da capacidade de transporte das águas até o corpo hídrico, provocando as inundações urbanas (ANDRADE FILHO, SZÉLIGA e ENOMOTO, 2000; TUCCI, 2007).

As inundações urbanas correspondem a cerca de 60% dos desastres naturais registrados no Brasil e 70% na América Latina e Caribe (FREITAS e XIMENES, 2012). Essas são responsáveis por diferentes danos à região afetada, tais como: perdas financeiras devido à interrupção do comércio e da fabricação de produtos industriais, perdas de objetos, mobílias, equipamentos, elementos decorativos, materiais armazenados e em elaboração, gastos com evacuação, reocupação, habitações provisórias e perdas de vidas, danos as obras e prédios históricos, etc. (SOUZA, GONÇALVES e GOLDENFUM, 2007).

Com o objetivo de minimizar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, ou seja, aumentar a infiltração das águas pluviais surgiram os pavimentos permeáveis, dispositivos considerados como uma das melhores práticas de gestão dos sistemas de drenagem urbana (URBONAS, 2000; TENNIS, LEMING e AKERS, 2004, FERGUNSON, 2006; DHALLA e ZIMMER, 2010).

Considerando as poucas aplicações dos pavimentos permeáveis no Brasil, diversos autores vêm estudando os materiais e suas proporções, métodos de dimensionamento e execução, tais como: Acioli (2005), Sales (2008), Virgiliis (2009), Coutinho (2011), Pinto (2011), Holtz (2011), Batezini (2013), Vidal (2014), Mariano (2014), Sandoval (2014) e Lamb (2014). No entanto, verificou-se a ausência da padronização dos procedimentos de compactação em laboratório, e considerando a influência desta etapa nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável, tornou-se o objetivo de estudo dessa dissertação.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto permeável possui uma ampla faixa de valores para suas propriedades hidráulicas e mecânicas, sendo que um dos principais fatores que contribuem para isso, além da dosagem da mistura é a energia de compactação aplicada durante a colocação no pavimento. Segundo Pieralisi, Cavalaro e Aguado (2015), conhecer a energia aplicada durante a aplicação do concreto permeável é de grande importância para a engenharia, pois determina o equipamento, a composição e o tipo de agregado necessário para sua produção.

Desse modo, o estudo do procedimento de compactação de corpos de prova de concreto permeável em laboratório, produzidos com diferentes granulometrias e energias de compactação, permitirá contribuir com o entendimento sobre o arranjo dos grãos e sua influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material, além de reproduzir amostras que possam ser correlacionadas com testemunhos extraídos de pavimentos.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

A energia de compactação aplicada em corpos de prova de concreto permeável moldado em laboratório pode ser considerada uma ferramenta de correlação para estimar suas propriedades mecânicas e hidráulicas?

1.3 HIPÓTESE

Existe correlação entre a energia de compactação e as propriedades mecânicas e hidráulicas de corpos de prova de concreto permeável produzidos em laboratório com agregados de diferentes granulometrias.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Propor um procedimento de compactação de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis aplicados em pavimentos de tráfego para pedestre, conforme requisitos da NBR 16416: 2015.

1.4.2 Objetivo Específico

- Verificar a influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades hidráulicas e mecânicas de corpos de prova de concreto permeável.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa tem como objeto de estudo apenas a camada de revestimento em concreto permeável, portanto não contempla as demais camadas que compõe o sistema de pavimento permeável e nem os outros tipos de pavimentos permeáveis classificados pela ABNT NBR 16416: 2015.

Também se limita a trabalhar com um traço de concreto e agregados graúdos provenientes da britagem de rocha basáltica por meio de britador de impacto de eixo vertical.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma contextualização sobre a problemática da impermeabilização do solo para a drenagem urbana e a justificativa para essa pesquisa. Ainda contempla a questão de pesquisa, hipótese, objetivos e estrutura da dissertação.

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica sobre o pavimento de concreto permeável. São apresentados os materiais constituintes, principais propriedades no estado fresco e endurecido, os métodos de compactação utilizados em laboratório por diversos autores e a influência nas propriedades do material.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos, sendo esse dividido em duas etapas: Estudo preliminar e Estudo Final.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nesse estudo e suas respectivas análises.

Finalmente, o capítulo 5 contempla as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTOS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o concreto permeável para pavimentação. Inicialmente é feita uma contextualização geral, na sequência são apresentados os materiais e proporções para a produção do concreto permeável assim como os principais valores das propriedades hidráulicas e mecânicas. Por fim, são enfatizados os métodos de compactação utilizados em diversas pesquisas em laboratório, e sua influência nas propriedades do concreto permeável.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pavimento permeável é composto pela combinação das camadas: revestimento permeável, camada de assentamento permeável, base permeável e sub-base permeável, ambas dimensionadas para suportar concomitantemente as cargas de tráfego, distribuir os esforços mecânicos ao subleito e permitir a infiltração e/ou acúmulo de água temporariamente (ABNT, 2015b).

A opção pelo sistema de infiltração depende do coeficiente de permeabilidade do subleito, que em algumas situações pode não conseguir absorver toda a água precipitada e desse modo, podem ser instalados drenos e/ou mantas geotêxteis para conduzir a água um reservatório ou destino desejado (EPA, 1999; NRMCA, 2008; BATEZINI, 2013; ABCP, 2013).

No Brasil, os requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção os pavimentos permeáveis de concreto, construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local são prescritos pela ABNT NBR 16416: 2015.

Devido à elevada permeabilidade, os pavimentos permeáveis provocam a infiltração quase imediata da água e desse modo, evitam o acúmulo de água na superfície do pavimento, reduzindo o risco de aquaplanagem. Por captar as águas pluviais contribuem para a manutenção de aquíferos subterrâneos, colaboram na prevenção de enchentes e diminuem a necessidade de redes de drenagem. Além disso, devido ao grande índice de vazios possuem boas propriedades acústicas e térmicas, contribuindo para a redução do ruído e das ilhas de calor no pavimento (EPA, 1999; LUCO, 2000; TENNIS, LEMING e AKERS, 2004)

No entanto, embora vantajoso em vários aspectos, o concreto permeável em pavimentos tem como limitações a fraca ligação entre as partículas o que resultada em baixos valores das propriedades mecânicas, além da possibilidade de ter os seus vazios obstruídos com o tempo, podendo ocorrer à redução da sua capacidade de permeabilidade (CHOPRA, WANIELISTA e MULLIGAN, 2007).

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

O concreto permeável é composto principalmente por cimento Portland, agregado graúdo e água, podendo conter agregado miúdo em quantidade inferior a 10% da massa total dos agregados da mistura (OBLA, 2010).

As proporções típicas dos materiais constituintes do concreto permeável, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1- Proporções típicas de materiais utilizados no concreto permeável.

Materiais	Proporções
Cimento Portland	180 a 555 kg/m ³
Agregado graúdo	964 a 2000 kg/m ³
Relação água cimento (a/c)	0,22 a 0,43
Traço em massa (cimento: agregado graúdo)	1:3 a 1:4,5

Fonte: Adaptado de Sandoval (2014).

Como apresentando no Quadro 1, tipicamente o consumo de cimento no concreto permeável está entre 180 a 555 kg/m³. Essa quantidade depende do tamanho do agregado graúdo, pois quanto menor for o agregado utilizado, maior é a quantidade cimento necessária para envolver o grão. Um teor de cimento insuficiente pode resultar em ligações fracas entre os agregados, provocando uma resistência à compressão menor (OBLA, 2010).

Ainda, verifica-se que as relações a/c empregadas na produção do concreto permeável, entre 0,22 e 0,43, são baixas quando comparadas ao concreto convencional, que possuem relações a/c $\leq 0,45$ (ABNT, 2014), explicada pela ausência ou pouca quantidade de agregado miúdo presente nas misturas.

2.2.1 Cimento Portland

Além do cimento Portland tipo I, também podem ser utilizados o cimento Portland do tipo II em conformidade com a ASTM C 150 ou o cimento Portland tipo IP o IS conforme a ASTM C595 (ACI 211.3R-02; CRMCA, 2009 e ORMCA, 2014). A correspondência aproximada entre cimentos nacionais e americanos está apresentado no Quadro 2.

Quadro 2- Correspondência aproximada entre cimentos nacionais e americanos.

Denominação	Sigla/ Tipo	Norma	Denominação	Sigla/Tipo	Norma
Portland	I	ASTM C150	Portland Comum Portland Comum com adição	CPI CP I-S	NBR 5732
Portland with Moderate Sulphate Resistance	II	ASTM C 150	Portland Resistente a Sulfatos	CP I RS CP I-S RS CP II-E RS CP II-F RS CP III RS CP IV RS	NBR 5737
Portland Blastfurmace Slag	IS	ASTM C 595	Portland de Alto Forno	CP III	NBR 5735
Portland Pozzolan	IP	ASTM C 595	Portland Pozolânico	CP IV	NBR 5736

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994).

O cimento do tipo I não é comercializado no Brasil, por isso, diferentes tipos de cimento Portland foram utilizados nas pesquisas com concreto permeável, conforme os objetivos dos autores. Por exemplo, Batezini (2013) justificou o uso do cimento Portland de Alto-Forno resistente aos sulfatos - CP III-40-RS como o mais indicado para a produção de concretos permeáveis, tendo em vista que a estrutura porosa permite um maior contato com o agente agressivo. Holtz (2011) e Lamb (2014) defenderam que a utilização do cimento Portland de alta resistência inicial- CP V-ARI pode ser uma opção, quando for necessário adquirir elevadas resistências nas primeiras idades, enquanto Sales (2008) e Vidal (2014) utilizaram o CP II-Z-32 e Sandoval (2014) CP II-F-32, por serem os cimentos mais comuns na região do estudo.

2.2.2 Água

A água desempenha um papel fundamental no concreto permeável, pois é responsável por hidratar o cimento por meio de reações químicas, e, portanto não devem conter impurezas capazes de afetar a resistência do concreto ou diminuir sua durabilidade (VÉLEZ, 2010).

Segundo Tennis, Leming e Akers (2004), a quantidade de água no concreto deve ser rigorosamente controlada, pois a falta de água provoca a secagem rápida da mistura, resultando numa fraca ligação entre os grãos, e o excesso de água conduz ao preenchimento dos vazios das camadas inferiores pela pasta. Os autores sugerem que seja realizado um teste visual ilustrado na Figura 1, quem tem como procedimento: colocar uma amostra do concreto permeável na palma da mão, a mesma não pode segregar conforme apresentado na Figura 1 a) e nem ter sua pasta escorrida para a camada inferior conforme visto na Figura 1b). O teor ótimo de água resulta em misturas semelhantes à visualizada na Figura 1c).

Figura 1- Concreto permeável com: a) pouca água; b) excesso de água; c) quantidade suficiente de água.



Fonte: Tennis, Leming e Akers (2004).

Devido à baixa relação a/c, para melhorar a trabalhabilidade e aumentar o tempo de aplicação, podem ser utilizados aditivos químicos tais como plastificante, superplastificante, látex, estabilizador de hidratação, incorporadores de ar, modificadores de viscosidade entre outros (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004; MAHBOUB *et al.*, 2009; SANDOVAL, 2014).

2.2.3 Agregado graúdo

Com relação ao agregado graúdo de acordo com Obla (2010), tipicamente utilizam-se o agregado graúdo com granulometria uniforme com

tamanho entre 19 e 9,5 mm. O emprego de tamanho 9,5 mm proporciona uma superfície mais acabada e por isso um maior conforto ao usuário do pavimento.

Segundo Farias e Palmeira (2013) o uso do agregado com granulometria uniforme, ou seja, onde todos os grãos possuem o mesmo tamanho, proporcionam misturas com maior porcentagem de vazios, pois não há grãos de tamanhos menores para ocuparem os espaços vazios entre os grãos.

Também podem ser utilizados agregados graúdos com granulometrias descontínuas e presença de agregado miúdo, com tamanhos de grãos entre 19,0 a 4,75 mm, 9,5 a 2,36 mm e 9,5 a 1,18 mm. Os agregados maiores proporcionam uma superfície mais áspera, enquanto os de menor tamanho são utilizados em estacionamentos e calçadas para pedestres (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004).

Além disso, quanto menor o tamanho de agregado, maior é a superfície específica, ou seja, maior é a área de ligação entre o agregado e a pasta, resultando em resistências maiores, mas em contrapartida, valores de porosidade e permeabilidade inferiores (YANG e JIANG, 2003; SCHAEFER *et al.*, 2006, FU *et al.*, 2014; JOSHAGHANI, RAMEZANIANPOUR e JABERIZADEH, 2014).

Com relação ao formato dos grãos do agregado graúdo, tanto os arredondados como os lamelares são utilizados na produção do concreto permeável, no entanto resistências menores são alcançadas quando se faz uso de agregados lamelares, pois o formato de agulha prejudica a trabalhabilidade e produzem um concreto com mais vazios (MEHTA e MONTEIRO, 1994; TENNIS, LEMING e DAVID, 2004).

Diante do exposto conclui-se que quanto maior a dimensão e mais uniforme for o agregado graúdo maior será a porcentagem de vazios, sendo mais elevada a permeabilidade dos concretos permeáveis.

2.3 PROPRIEDADES

No estado fresco do concreto permeável, as propriedades avaliadas são: a consistência e a massa específica. No estado endurecido, as propriedades podem ser divididas em propriedades hidráulicas e mecânicas.

2.3.1 Propriedades no estado fresco

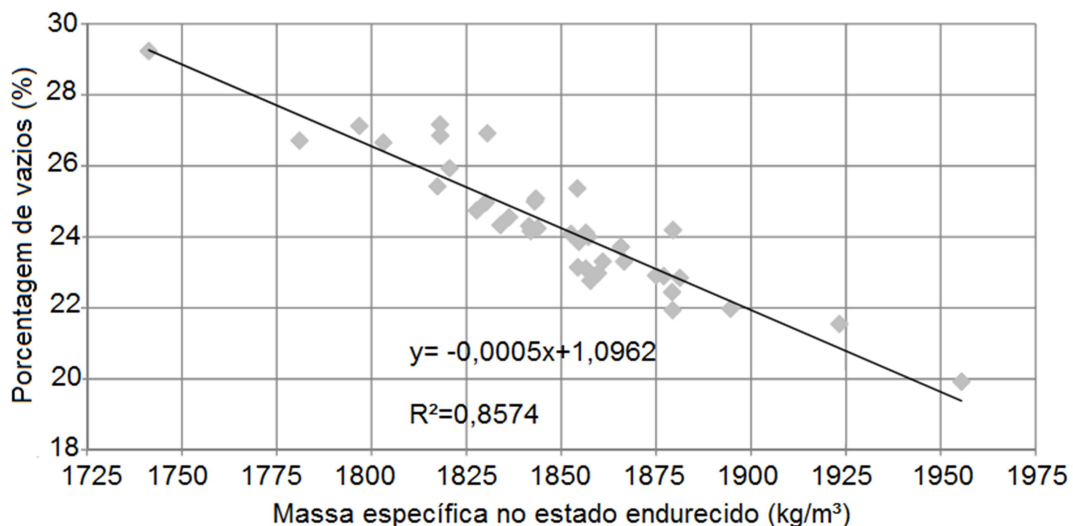
Com relação à consistência do concreto, sua determinação diferente do concreto convencional, não é considerada um critério de aceitação, embora geralmente sejam utilizados valores menores que 20 mm (OBLA, 2010; COSIC *et al.*, 2015).

Por sua vez, a massa específica do concreto permeável pode ser considerada um parâmetro de controle, sendo comuns valores entre 1600 e 2000 kg/m³, enquanto no concreto convencional o valor encontra-se entre 2000 e 2800 kg/m³ (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004; OBLA, 2010; ABNT, 2015a).

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015b), o valor mínimo para a massa específica, especificado em projeto de pavimentos permeáveis, deve ser 1600 kg/m³, com tolerância no estado fresco e endurecido de 80 kg/m³.

Para Batezini (2013), a massa específica por ser uma propriedade de fácil obtenção, pode ser utilizada como parâmetro de dosagem, e como mostra a Figura 2, apresenta uma correlação com a porcentagem de vazios.

Figura 2- Correlação linear entre a porcentagem de vazios e a massa específica no estado endurecido.

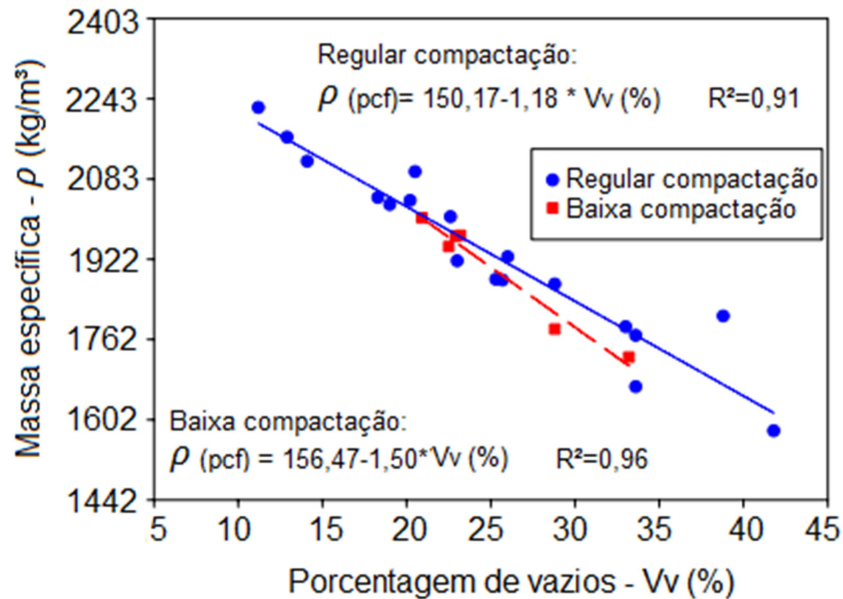


Fonte: Batezini (2013).

Analisando a Figura 2, verifica-se que quanto maior for a massa específica, menor é a porcentagem de vazios nos concretos, apresentando uma correlação linear entre as duas propriedades.

Schaefer *et al.* (2006) para dois procedimentos de compactação (regular e baixo), apresentaram a correlação entre a massa específica e a porcentagem de vazios, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3- Correlação entre a massa específica e a porcentagem de vazios para concretos compactados por dois procedimentos de compactação.



Fonte: Adaptado de Schaefer *et al.* (2006).

Verifica-se que para massas específicas entre 1442 e 2403 kg/m³ os concretos apresentaram porcentagem de vazios entre 5 a 45%, apresentando uma correlação linear entre as propriedades, de modo que, com o aumento dos vazios nos concretos, menor é a massa específica dos mesmos.

2.3.2 Propriedades Hidráulicas

As propriedades hidráulicas geralmente avaliadas no concreto permeável são a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade. Deste modo, são descritos a seguir os valores típicos dessas propriedades juntamente com os métodos utilizados para sua avaliação.

2.3.2.1 Porcentagem de vazios

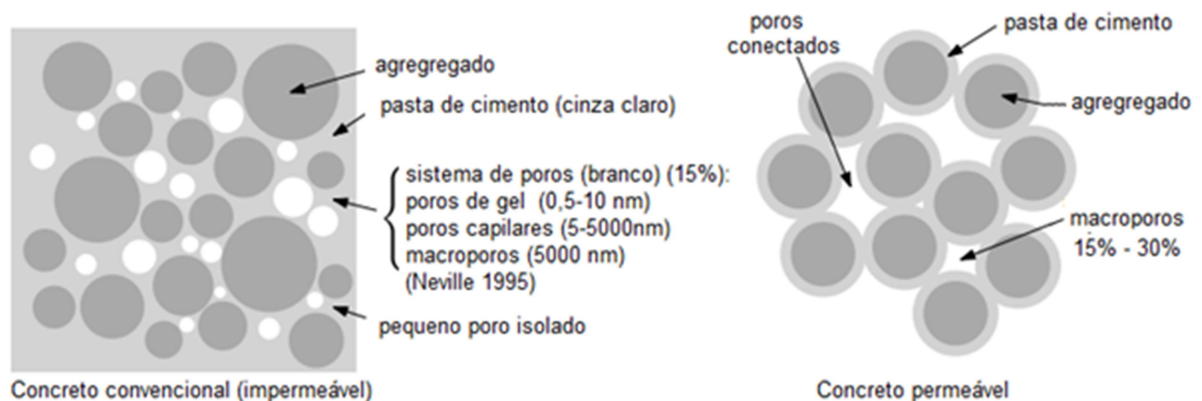
No concreto permeável, geralmente formados por agregados de diâmetro único, unidos por uma pasta de cimento ou argamassa, existem muitos

vazios com diâmetros superiores a 1 mm, sendo esses os responsáveis pela infiltração da água (YANG e JIANG, 2003).

O concreto permeável apresenta uma porcentagem de vazios entre 15 a 35%, valores que dependem de diversos fatores, tais como o método de compactação, teor de agregado miúdo na mistura, do tipo e tamanho do agregado graúdo (SCHAEFER *et al.*, 2006; NEITHALATH, SUMANASOORIYA e DEO, 2010).

O concreto permeável, diferente do concreto convencional, possui uma significativa quantidade de poros conectados entre os agregados graúdos, e são esses que participam efetivamente no transporte de água. Também são compostos por poros isolados, poros capilares e sem saída, conforme visualizado na Figura 4 (MONTES, VALAVALA e HASELBACH, 2005; KUOSA, NIEMELAINEN e LOIMULA, 2013).

Figura 4- Comparação entre o concreto convencional e o concreto permeável.



Fonte: Zhong e Wille (2015).

Para determinar a porcentagem de vazios no concreto permeável, pode-se utilizar o método de análise das imagens, como feito por Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010) e Radlinska *et al.* (2012), ou o método volumétrico, utilizado neste trabalho e por este motivo descrito a seguir.

O método de volumétrico utilizado por Ravindrarajah e Yukari (2010), Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012), Batezini (2013) e Rehder, Banh e Neithalath (2014), baseia-se no princípio de Arquimedes onde a força exercida por um fluido sobre um corpo parcial ou totalmente submerso é igual ao peso do volume de líquido deslocado pelo corpo. Assim pelas Equações 1, 2 e 3 obtêm-se porosidades aberta, fechada e total (KIM e LEE, 2010).

$$A_{total}(\%) = \left(1 - \frac{W_3 - W_1}{V_1 \rho_w}\right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

$$A_{aberta}(\%) = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{V_1 \rho_w}\right) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

$$A_{fechada}(\%) = A_{total}(\%) - A_{aberta}(\%) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

A_{total} = Porosidade total em %;

A_{aberta} = Porosidade aberta em %;

$A_{fechada}$ = Porosidade fechada em %;

W_1 = Massa da amostra submersa em kg;

W_2 = Massa da amostra superfície saturada seca em kg;

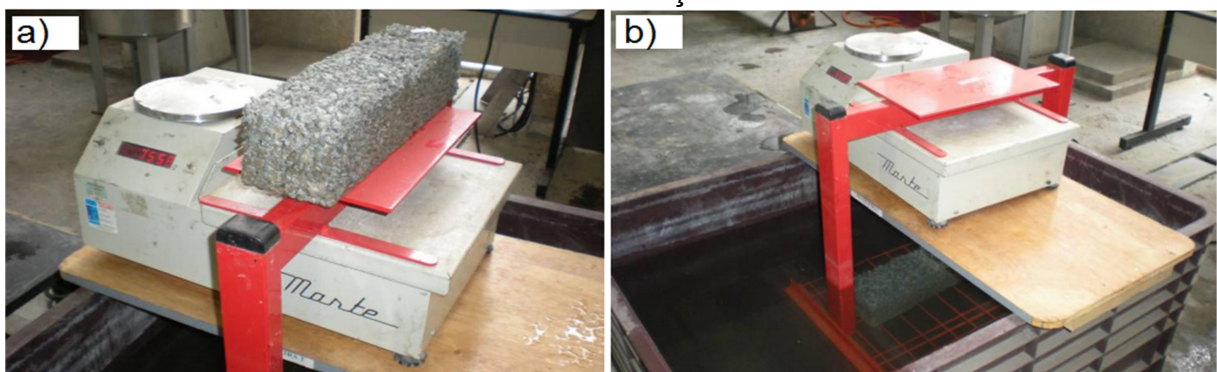
W_3 = Massa da amostra seca em estufa em kg;

V_1 = Volume da amostra em m³;

ρ_w = Densidade da água em kg/m³.

A porosidade aberta é a responsável pela infiltração da água no concreto permeável e a porosidade total é a soma da porosidade aberta mais a porosidade fechada. Na Figura 5, é mostrado o procedimento para avaliação da porosidade aberta, onde é feita a pesagem do corpo de prova de concreto permeável em condição superfície saturada seca- SSS (Figura 5 a) e posteriormente sua pesagem submersa em água (Figura 5 b).

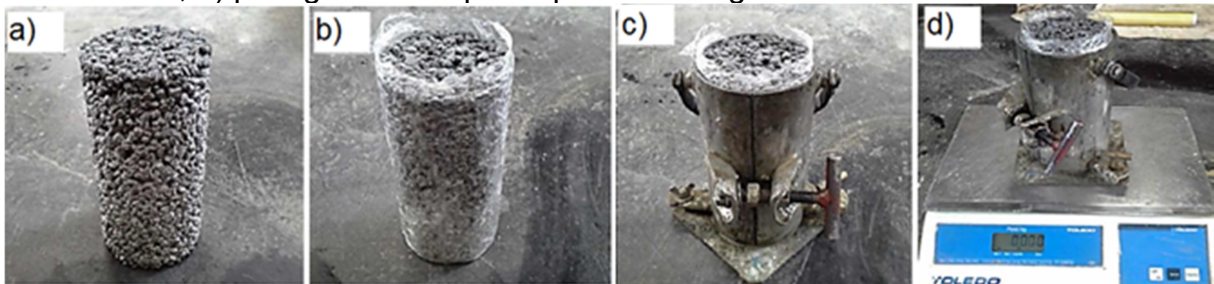
Figura 5- Medição dos vazios no concreto permeável baseado no princípio de Arquimedes: a) pesagem da amostra em condição SSS; b) pesagem submersa da amostra em condição SSS.



Fonte: Batezini (2013).

Outro método volumétrico utilizado por Neithalath, Weiss e Olek (2006), Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010), Deo e Neithalath (2011) e Sandoval (2014), consiste em envolver o corpo de prova em filme plástico e em fita adesiva transparente (ou outro material que garanta sua vedação) e adicionar água até que a mesma aflore em sua superfície superior. Na Figura 6, é mostrada a sequência de montagem do ensaio de medição dos vazios por Sandoval (2014).

Figura 6- Medição dos vazios pelo método volumétrico: a) corpo de prova; b) corpo de prova envolto em filme plástico e fita adesiva; c) corpo de prova dentro do molde metálico; d) pesagem do corpo de prova com água dentro do molde metálico.



Fonte: Sandoval (2014).

Com a massa do corpo de prova e a massa do corpo de prova com água, por meio da Equação 4, tem-se a porcentagem de vazios nas amostras.

$$V_v = \frac{V_{\text{água}}}{V_{cp}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

V_v = vazios (%);

$V_{\text{água}}$ = Volume de água adicionado até a superfície superior (m^3);

V_{cp} = Volume do corpo de prova (m^3).

Cabe ressaltar que o corpo de prova pode estar seco em estufa ou com superfície saturada seca, e para cada caso, calcula-se respectivamente a porosidade total e a porosidade aberta.

2.3.2.2 Permeabilidade

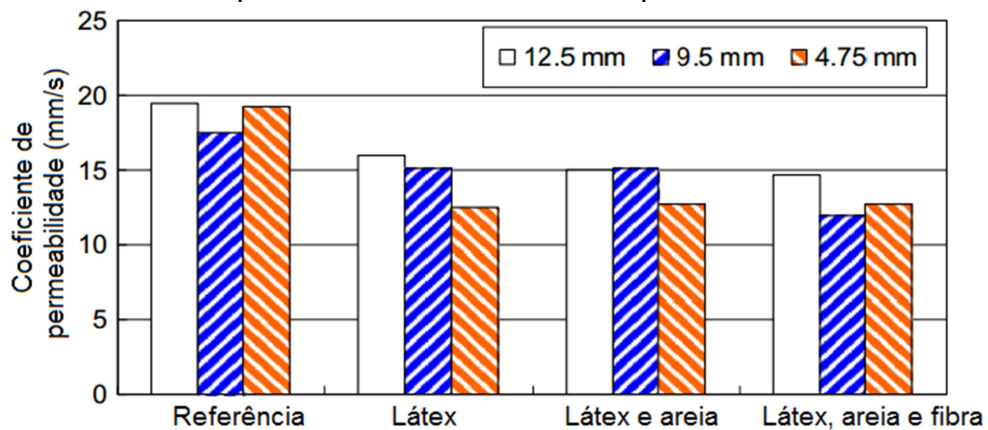
O coeficiente de permeabilidade (k) do concreto permeável quando usado em pavimentos está na faixa de 120 $\text{l/m}^2/\text{min}$ ou 2 mm/s a 320 $\text{l/m}^2/\text{min}$ ou

5,4 mm/s, valores que dependem principalmente da porosidade do material e formas de execução do pavimento (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004; ZHONG e WILLE, 2015).

Zhifeng *et al.* (2008) estudaram a influência do tamanho do agregado graúdo no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. Para agregados com tamanho entre 19 e 37,5 mm, 16 e 31,5 mm, 13,2 e 26,5 mm e 9,5 e 19 mm, obtiveram coeficientes de permeabilidade respectivamente de 46,9 mm/s, 43,1 mm/s, 32,2 mm/s e 27,0 mm/s, onde se verifica que com o aumento do tamanho do agregado maior foram os coeficientes de permeabilidade dos concretos.

Huang *et al.* (2010) para três tamanhos de agregado, uso de látex, sendo sua parte sólida utilizada para substituir 10% do cimento, areia natural em substituição a 7% da massa do agregado graúdo, e 0,9 kg/m³ de fibra de polipropileno de comprimento médio dos fios igual 20 mm, avaliaram a influência destes fatores no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. Os resultados são apresentados na Figura 7.

Figura 7- Efeito da dimensão máxima do agregado, látex, areia e fibra no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.

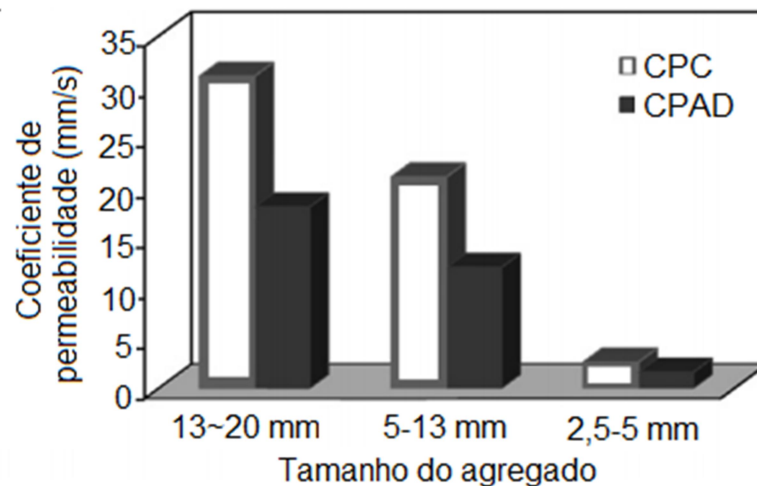


Fonte: Huang *et al.* (2010).

Verifica-se na Figura 7, que as misturas apresentaram coeficientes de permeabilidade entre 10 e 20 mm/s, valores suficientes para serem utilizados em pavimento. Observa-se que a graduação do agregado não mostrou influência significativa na propriedade, ao contrário do látex, da areia e da fibra. A redução da permeabilidade provocada por esses materiais pode ser aceita, quando avaliada a propriedade mecânica das misturas.

Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) para três tamanhos de agregados graúdos, avaliaram a influência do tamanho do agregado no concreto permeável com e sem aditivos. Os aditivos utilizados foram superplastificante e coesivo (pó de polímero à base de celulose solúvel em água), e os resultados são apresentados na Figura 8.

Figura 8- Efeito do tamanho do agregado sobre o coeficiente de permeabilidade à água do concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012).

Com coeficientes de permeabilidade entre 1 e 35 m/s, verifica-se que o tamanho do agregado influenciou nessa propriedade, sendo que o uso da brita de menor tamanho, 2,5~5 mm, apresentou ser o menos permeável, pois a mistura tem maior compactidade. Comparado concreto permeável de cimento Portland sem aditivo - CPC e com aditivos – CPAD, verifica-se que o uso dos aditivos diminuiu significativamente a permeabilidade das amostras.

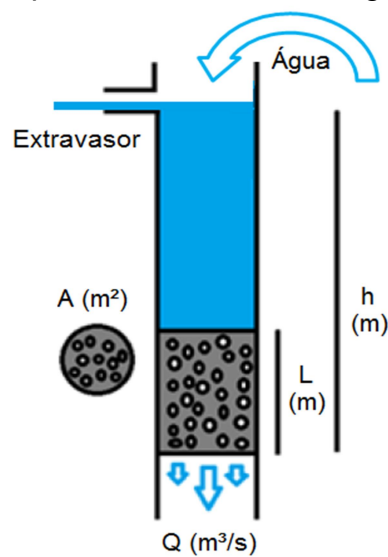
Ibrahim *et al.* (2014) produziram vinte e quatro misturas de concreto permeável, com variação no consumo de cimento (150, 200 e 250 kg/m³), no consumo de agregado graúdo (1500, 1600 e 1800 kg/m³), nas relações água/cimento (0,30, 0,40 e 0,35) e nos tamanhos dos agregados graúdos, com uso de tamanhos únicos (4,5 mm, 9,5 mm e 12 5 mm) ou combinados. Os autores encontraram valores de coeficientes de permeabilidade entre 15 e 28,2 mm/s, sendo o primeiro valor verificado na mistura com agregado de tamanho único 9,5 mm e o último com agregado de tamanho único 12,5 mm.

Diante do exposto, verifica-se nos trabalhos, para os diferentes tamanhos de agregado, foi possível produzir concretos com coeficientes de permeabilidade entre 1 e 47 mm/s.

Outro fator que influencia nos valores do coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis é o método de avaliação. Nos estudos feitos por Sandoval (2014) e Batezini e Balbo (2015), os autores verificaram que os concretos avaliados pelo permeâmetro de carga variável apresentaram coeficientes de permeabilidade mais elevados e com maior dispersão dos resultados quando comparado aos valores obtidos pelo permeâmetro de carga constante.

Desse modo, de acordo com Sandoval (2014) o permeâmetro de carga constante, esquematizado na Figura 9, é o mais sensível para medição da permeabilidade do concreto permeável.

Figura 9- Esquema do ensaio de carga constante.



Fonte: Adaptado de Sandoval (2014).

Como visto na Figura 9, o nível de água sobre a amostra é garantido pelo extravasor.

Com a vazão da água e as características geométricas do permeâmetro, pela Lei de Darcy, calcula-se por meio da aplicação da Equação 5 o coeficiente de permeabilidade (PINTO, 2006).

$$k = \frac{Q}{iA}$$

Equação 5

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade (m/s);

Q= Vazão coletada (m³/s);

A= Seção transversal da amostra (m²);

i = Gradiente hidráulico (h/L);

h= Altura de água até a face inferior da amostra (m);

L= Altura da amostra no permeâmetro (m).

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015b), independentemente do tipo de revestimento adotado, o pavimento permeável deve permitir a percolação de 100% da água precipitada sobre sua área e apresentar um coeficiente de permeabilidade superior a 1 mm/s quando recém-construído.

2.3.3 Propriedades Mecânicas

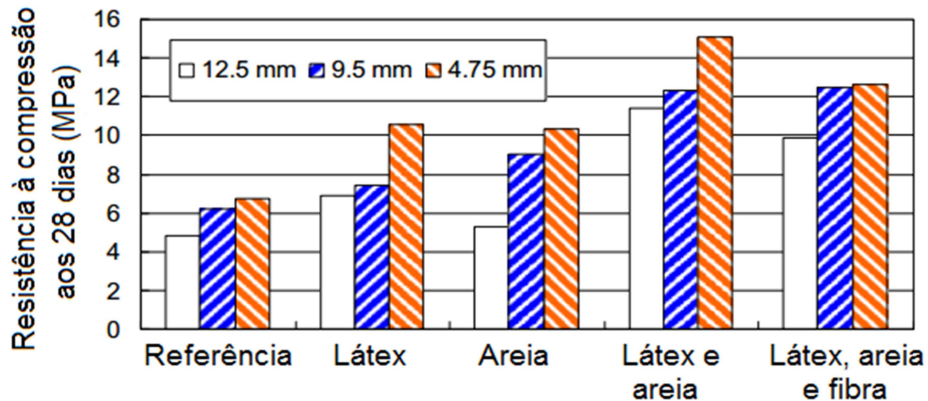
As propriedades mecânicas usualmente avaliadas no concreto permeável são resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Os valores típicos dessas propriedades são apresentados a seguir.

2.3.3.1 Resistência à compressão

As misturas de concreto permeável podem desenvolver resistências à compressão aos 28 dias entre 3,5 e 28 MPa, sendo típicos valores próximos a 17 MPa, valores que dependem da dosagem e das técnicas de colocação do material no pavimento (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004; OBLA, 2010).

Huang *et al.* (2010) analisaram o efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo, da adição de agregado miúdo e látex na resistência à compressão do concreto permeável, conforme apresentando na Figura 10.

Figura 10- Efeito da dimensão máxima característica do agregado, látex, areia e fibra na resistência à compressão do concreto permeável.

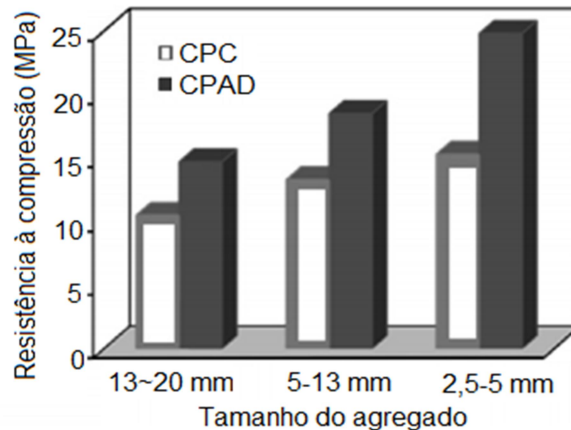


Fonte: Huang *et al.* (2010).

Analisando a Figura 10, verifica-se que o uso do agregado de menor tamanho produziu concretos permeáveis mais resistentes. Por sua vez a adição de látex (parte sólida em substituição a 10% de cimento) e areia natural em substituição a 7% da massa do agregado graúdo proporcionaram a maior resistência à compressão das amostras estudadas, apresentando valores superiores a 10 MPa. Esse resultado está de acordo com a afirmação feita por Luco, Vítola e Salminci (1998). Segundo os autores para aumentar as propriedades mecânicas do concreto permeável deve-se melhorar a argamassa que envolve as partículas dos agregados, visto que essa argamassa forma a ponte entre os agregados é a responsável pela transmissão dos esforços entre as partículas.

Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) estudaram o efeito do tamanho do agregado na resistência à compressão de concretos permeáveis sem e com a adição de superplastificante e polímero à base de celulose solúvel em água. Os resultados são apresentados na Figura 11, onde se verifica que o uso do agregado de menor tamanho, devido à diminuição dos vazios e aumento da massa unitária provocou um ganho na resistência à compressão dos concretos, sendo que a combinação do menor agregado e do aditivo produziram valor superior a 15 MPa.

Figura 11- Efeito do tamanho do agregado sobre a resistência à compressão do concreto permeável.



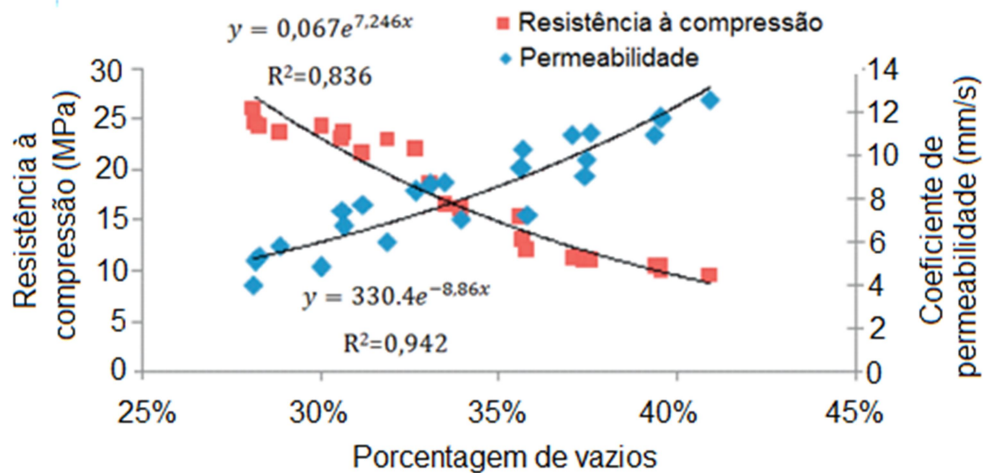
Fonte: Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012).

Segundo os autores, além de melhorar a trabalhabilidade, os aditivos garantiram uma maior colagem entre os grãos feitos pela pasta.

Maguesvari e Narasimha (2013), com o objetivo de determinar a mistura ideal, combinaram quatro tamanhos de agregado graúdo: 4,75 – 9 mm, 9-12 mm, 12-16,5 mm e 16,5-19 mm, e seis teores de adição de areia em substituição a massa do agregado graúdo: 0 a 50%. Para o consumo de cimento 400 kg/m³, traço 1: 4,75 (cimento: agregados) e relação água/cimento igual a 0,34, os autores encontram valores de resistência à compressão entre 10 e 30 MPa, no entanto, consideraram os concretos com valores entre 15 e 20 MPa e coeficiente de permeabilidade entre 0,6 cm/s e 0,8 cm/s, como ótimas, são elas: 16-19,5 mm com 30% de areia, 12,5-16 mm com 30% de areia, 9-12,5 mm com 20% de areia e 4,75-9 mm com 20% de areia.

Na Figura 12, é apresentada a correlação entre a resistência à compressão, o coeficiente de permeabilidade e a porcentagem de vazios dos concretos estudados por Maguesvari e Narasimha (2013). Segundo os autores, as misturas consideradas ótimas, são as que têm equilíbrio entre a resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade.

Figura 12- Correlação entre a resistência à compressão, o coeficiente de permeabilidade e porcentagem de vazios



Fonte: Magesvari e Narasimha (2013).

Verifica-se que com o aumento da porcentagem de vazios, maior são os valores dos coeficientes de permeabilidade e menor de resistência à compressão dos concretos.

Ibrahim *et al.* (2014) avaliaram a influência do consumo de cimento, relação água/cimento e composição granulométrica sobre a resistência à compressão do concreto permeável. Os autores encontraram valores para essa propriedade entre 1 a 7 MPa, sendo o menor valor foi obtido no concreto com brita de tamanho único 12,5 mm e consumo de cimento igual a 150 kg/m³, e o maior valor no concreto com brita de tamanho 9,5 mm e consumo de cimento igual a 250 kg/m³, ambos com relação água cimento igual a 0,35.

2.3.3.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão em concretos permeáveis geralmente está entre 1 MPa e 3,8 MPa, sendo valor suficiente para receber altas cargas por eixo, por exemplo, caminhão de lixo, veículos de emergência, como caminhões de bombeiro, etc. (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004; OBLA, 2010).

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015b) os valores mínimos de resistência à tração na flexão para os pavimentos de concreto permeável moldado no local, em função do tipo de solicitação são indicados no Quadro 3.

Quadro 3- Requisitos para pavimento de concreto permeável moldado no local.

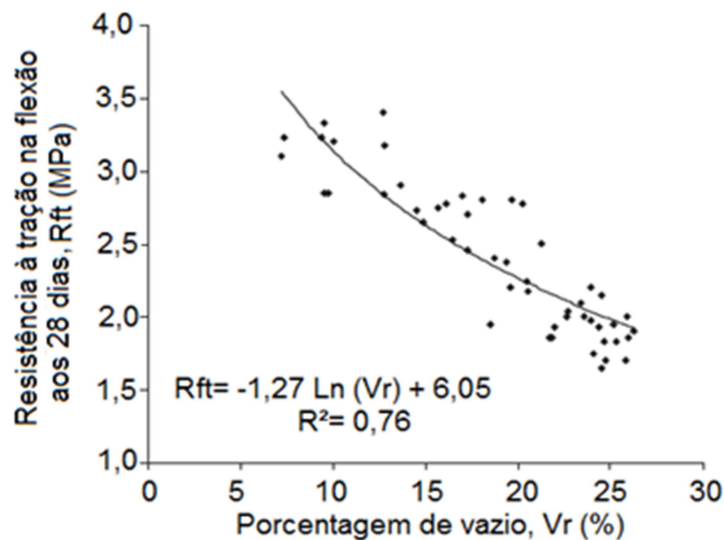
Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,00	$\geq 1,0^a$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,00	$\geq 2,0^a$	

^a determinação da resistência à tração na flexão, conforme ABNT NBR 12142.

Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015b).

Solminihac *et al.* (2007) verificaram a relação entre a resistência a tração na flexão aos 28 dias e a porcentagem de vazios para diferentes misturas de concretos permeáveis, apresentadas na Figura 13.

Figura 13- Relação entre a resistência à tração na flexão e porcentagem de vazios.

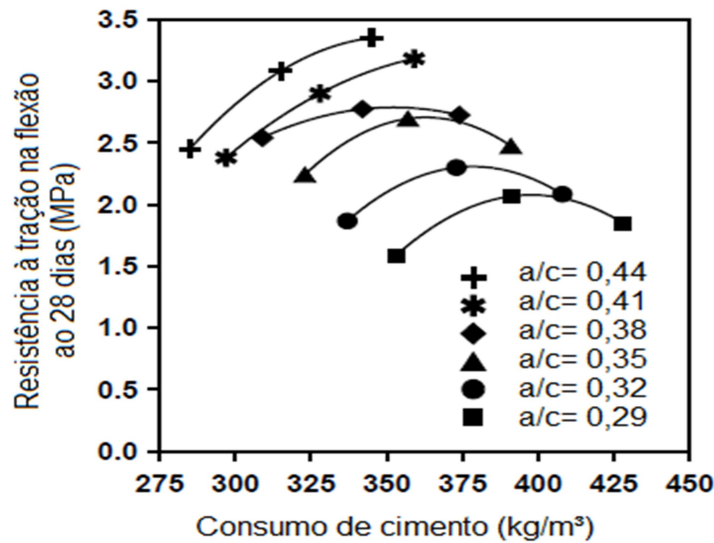


Fonte: Solminihac *et al.* (2007).

Analisando a Figura 13, verifica-se que para concretos com porcentagem de vazios entre 5 e 30%, a resistência à tração na flexão variou entre 1,5 a 3,5 MPa, sendo mais resistentes aqueles que apresentaram menos vazios.

Castro *et al.* (2009) verificaram a influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para diferentes relações água/cimento, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14- Efeito do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para diferentes relações água/cimento.

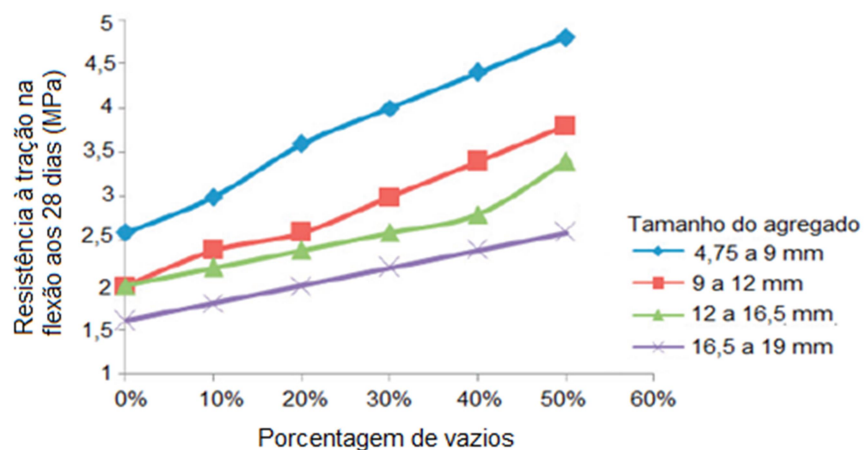


Fonte: Castro *et al.* (2009).

Para todos os concretos permeáveis, os valores de resistência à tração na flexão foram superiores a 1 MPa, no entanto, segundo os autores não é aconselhável a utilização de misturas com relação água/cimento menor que 0,32, tendo em vista que devido a baixa quantidade de água, a pasta de cimento formada foi insuficiente para garantir a união dos agregado graúdo, provocando perda superficial do material.

Maguesvari e Narasimha (2013) estudaram a influência da adição de agregado miúdo em substituição a massa do agregado graúdo em diferentes teores na resistência à tração na flexão do concreto permeável. Os resultados são apresentados na Figura 15.

Figura 15- Influência da adição de agregado miúdo na resistência à tração na flexão.

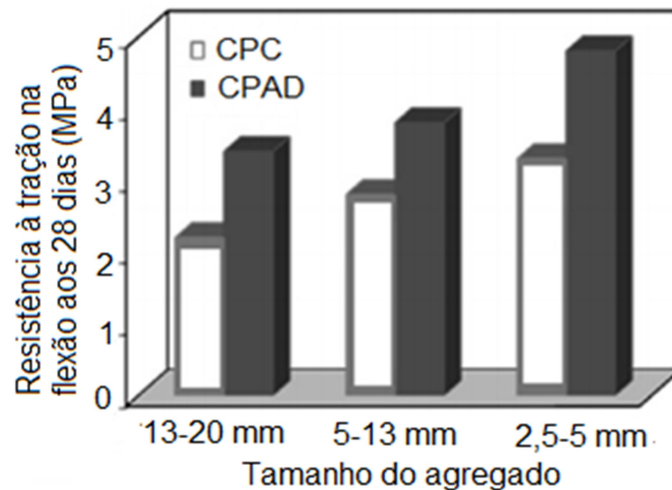


Fonte: Maguesvari e Narasimha (2013).

Analisando a Figura 15, verifica-se valores de resistência à tração na flexão entre 1,5 e 5 MPa, sendo maiores os valores quando combinado um agregado graúdo de menor tamanho e adição de areia. Além disso, para todas as misturas com o aumento da porcentagem de agregado miúdo em substituição ao agregado graúdo, maiores foram os valores de resistência à tração na flexão.

Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) estudaram o efeito da adição do superplastificante e polímero com base solúvel em água na resistência à tração na flexão do concreto permeável de cimento Portland – CPC, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16- Efeito dos aditivos na resistência à tração na flexão aos 28 dias do concreto permeável.

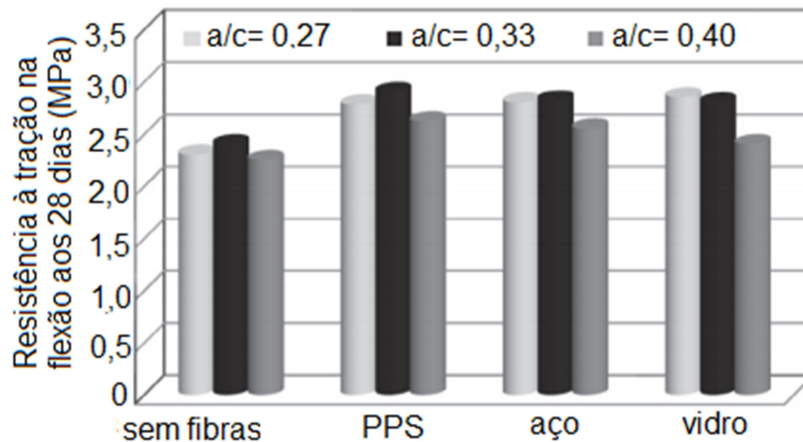


Fonte: Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012).

Verifica-se na Figura 16, que com o uso de aditivo superplastificante e polímero com base solúvel em água – CPAD, produziram-se concretos com valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias superiores a 3,5 MPa. Além disso, com a diminuição do tamanho do agregado graúdo, maiores foram os valores de resistência à tração na flexão aos 28 dias para todas as misturas.

Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) estudaram o efeito de três tipos de fibras: vidro, aço e Polissulfeto de Fenileno – PPS no concreto permeável, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17- Influência da adição de fibras na resistência à tração na flexão aos 28 dias em concretos permeáveis.



Fonte: Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014).

Para todas as relações água/cimento, verifica-se que a adição de fibras promoveu um aumento na resistência à tração na flexão dos concretos permeáveis. De acordo com Thakre *et al.* (2014), o ganho no valor dessa propriedade é uma consequência, pois o grande objetivo da adição desse material é controlar e retardar as fissuras que aparecem no concreto permeável. Com relação ao tipo de fibra, a fibra de polissulfeto de Fenileno, devido a sua maior flexibilidade e facilidade de mistura ao concreto, para as três relações água/cimento resultaram em valores de resistência à tração na flexão do concreto permeável superiores aos concretos com as outras fibras.

2.4 MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO

Meininger (1988) avaliou o efeito de oito métodos de compactação sobre a resistência à compressão e massa específica de corpos de prova de dimensões 152 x 305 mm. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das amostras produzidas com relações água/cimento igual a 0,31 e 0,34 e oito métodos de compactação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Resistência à compressão do concreto para diferentes relações água/cimento e método de compactação

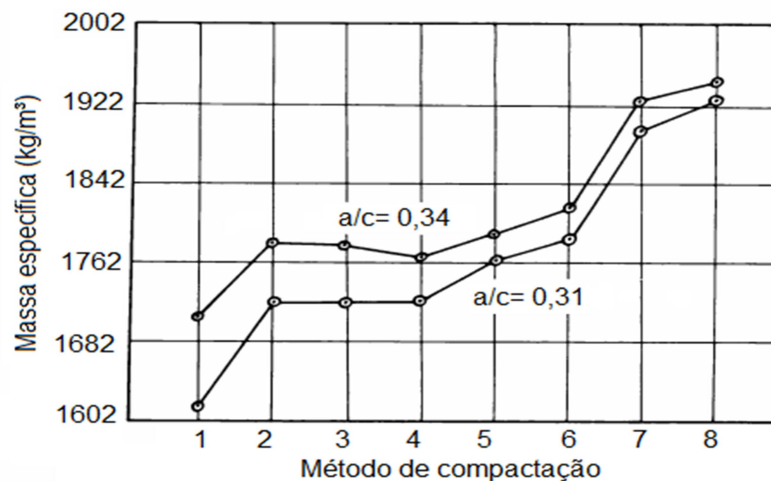
Nº	Método de compactação	f _c (MPa)	
		a/c= 0,34	a/c=0,31
1	Sem compactação	-	-
2	2 camadas, inclinar e soltar o molde	-	-
3	2 camadas, 5 golpes por camada com compactador do tipo "Tamper" de 2,3 kg e Ø = 102 mm	6,7	9,4
4	2 camadas, 5 quedas por camada com compactador do tipo "Tamper" de 2,3 kg e Ø = 102 mm	7,3	9,3
5	2 camadas, 5 quedas por camada com Proctor Hammer	7,6	9,4
6	2 camadas, 15 golpes por camada com compactador do tipo "Tamper" de 2,3 kg e Ø = 102 mm	9,6	10,7
7	3 camadas, 25 quedas por camada com Proctor Hammer	10,6	13,4
8	3 camadas, 25 golpes por camada com Haste de adensamento – ASTM C 31	14,5	17,1

Fonte: Adaptado de Meininger (1988).

Os autores verificaram que os métodos de compactação 1 e 2 produziram concretos com grandes vazios e descontinuidades e encontraram para os demais métodos de compactação valores de resistência à compressão aos 28 dias entre 6 e 17 MPa, sendo maiores os valores nas misturas com relação água/cimento igual 0,34.

A influência dos métodos de compactação apresentados na Tabela 1 sobre a massa específica dos concretos permeáveis com duas relações água/cimento é apresentada na Figura 18.

Figura 18- Massa específica do concreto permeável para oito métodos de compactação em laboratório e duas relações a/c.

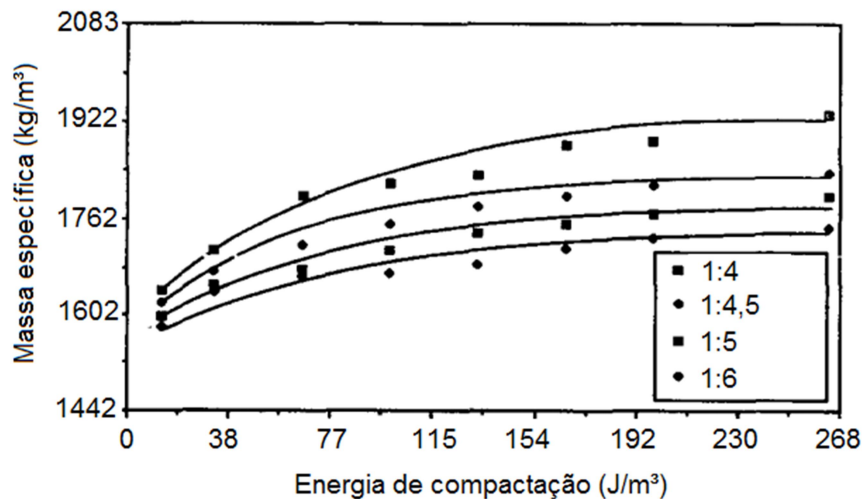


Fonte: Adaptado de Meininger (1998).

Observa-se na Figura 18, que para os métodos de compactação estudados, as massas específicas dos concretos permeáveis variaram entre 1600 e 2000 kg/m³, sendo que os maiores valores foram nas misturas com relação água/cimento 0,34.

Ghafoori e Dutta (1995), para diferentes misturas verificaram o efeito de oito energias de compactação aplicadas com Proctor Hammer de 2,27 kg com altura de queda padronizada de 305 mm sobre a massa específica, resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade de quatro misturas de concreto permeável, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19- Influência da energia de compactação na massa específica de diferentes traços em massa de concreto permeável.

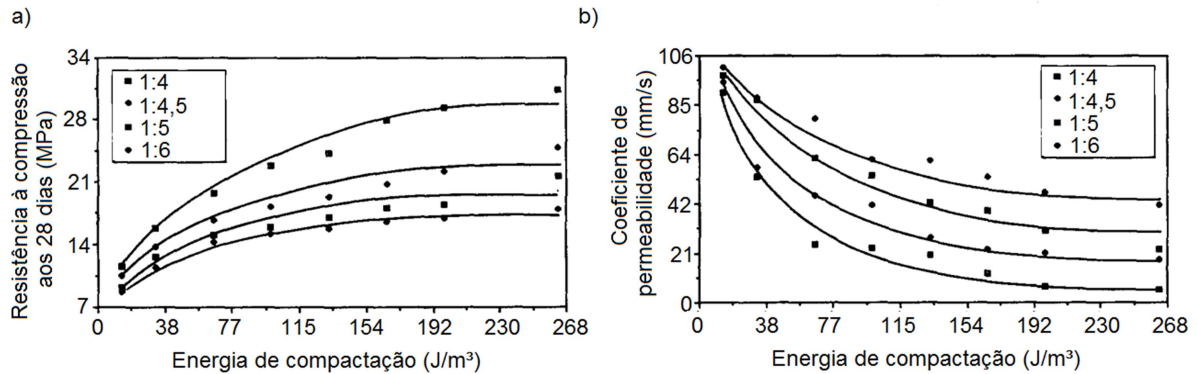


Fonte: Adaptado de Ghafoori e Dutta (1995).

Observa-se que para as energias de compactação empregadas, foi possível produzir concretos permeáveis com massas específicas entre 1500 e 2000 kg/m³, sendo que os concretos produzidos no traço 1:4 (cimento: agregado graúdo) apresentaram maiores valores, isso devido a menor quantidade de agregado graúdo utilizado e conseqüentemente redução dos vazios na mistura.

Na Figura 20 é apresentada a influência das energias de compactação sobre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável produzido em quatro traços em massa.

Figura 20- Influência da energia de compactação: a) resistência à compressão; b) coeficiente de permeabilidade.



Fonte: Adaptado de Ghafoori e Dutta (1995).

Verifica-se que para as energias avaliadas, foi possível produzir concretos com resistência à compressão entre 7 e 34 MPa e coeficientes de permeabilidade entre 0 e 106 mm/s, sendo que com o aumento da energia de compactação e diminuição do agregado graúdo no traço, mais resistentes e menos permeáveis ficaram os concretos, justificado pela diminuição dos vazios nas misturas.

Ainda, Ghafoori e Dutta (1995) verificaram que as propriedades do concreto compactado com a haste de adensamento (3 camadas, 25 golpes por camadas – ASTM C31) são semelhantes as amostras que receberam a energia de compactação igual a 33 J/m³ e sugeriram como referência o traço em massa de 1: 4 (cimento: agregado graúdo), com massa específica mínima, resistência à compressão e energia de compactação respectivamente de 1842 kg/m³, 24,13 MPa e 132 J/m³.

Crouch *et al.* (2006) usando dois tipos de agregado graúdo (calcário e seixo rolado), com tamanhos N.89 (9,5 a 1,18 mm), N.78 (12,5 a 2,36 mm), N.57 (25 a 4,75 mm) e seixo rolado como recebido, ou seja, não foi feita a montagem dentro das curvas granulométricas como os agregados anteriores, avaliaram as propriedades hidráulicas do concreto permeável submetidos a seis procedimentos de compactação. Os níveis de compactação e sua identificação são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4- Método de compactação e identificação dos métodos.

Procedimentos de compactação	Identificação*
1 camada, 2 golpes por camada com Marshall	2
1 camada, 5 golpes por camada com Marshall	5
3 camadas, 25 golpes por camada com haste e 3 golpes por camada com Marshall	9
3 camadas, 25 golpes por camada com haste e 6 golpes por camada com Marshall	18
3 camadas, 25 golpes por camada com haste e 14 golpes por camada com Marshall	42
3 camadas, 25 golpes por camada com haste e 26 golpes por camada com Marshall	78

* Total de golpes aplicado no corpo de prova.

Fonte: Adaptado de Crouch *et al.* (2006).

Os resultados das porcentagens de vazios e coeficiente de permeabilidade obtidos por Crouch *et al.* (2006) pelos seis procedimentos de compactação e cinco agregados graúdos, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades hidráulicas dos concretos permeáveis com diferentes graduações de agregado graúdo e procedimento de compactação.

Identificação do procedimento de compactação	Porcentagem de vazios (%)				
	Nº 89 Calcário	Nº 78 Calcário	Nº 57 Calcário	Nº 89 Seixo rolado	Seixo rolado*
2	34,8	36,1	35,5	32,3	39,8
5	31,9	33,3	33,4	28,9	34,1
9	25,5	27,6	26,3	24,6	30,2
18	22,8	24,3	25,4	19,3	31,1
42	18,3	20,3	24,3	13,8	29,9
78	13,2	18,1	21,2	11,3	27,4
Identificação do procedimento de compactação	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)				
	N.89 Calcário	N. 78 Calcário	N.57 Calcário	N. 89 Seixo rolado	Seixo rolado*
2	12	33,2	60,3	4,3	31
5	7,3	11,5	18,8	1,3	18
9	1,5	1,7	4,4	0,4	0,1
18	0,8	0 ^a	0,7 ^b	0,1	0,6
42	0,1	0 ^a	0,7 ^b	0	0,7
78	0,03	0 ^a	0,1 ^b	0	0,3

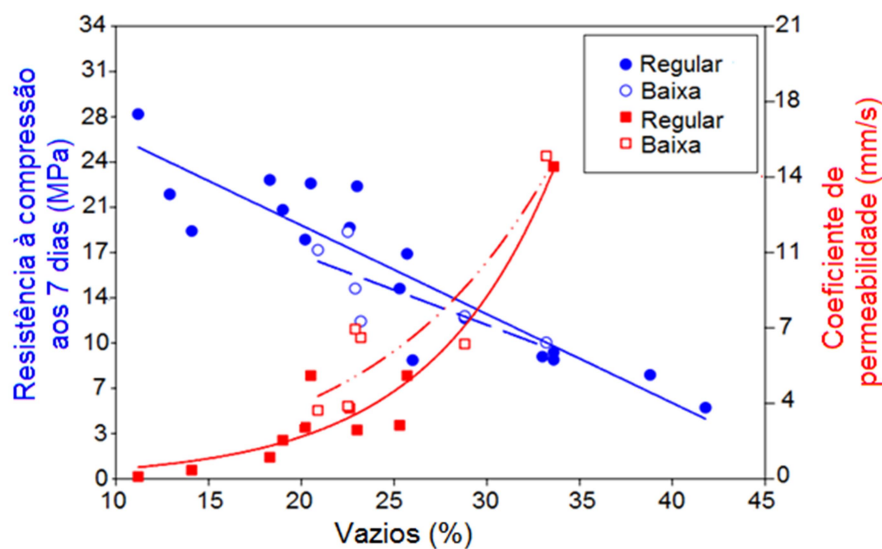
* Como recebido. a Amostras entupidas; b Extremidades cortadas para reduzir o efeito das bordas;

Fonte: Crouch *et al.* (2006).

Verifica-se que o agregado e menor tamanho (N.89) produziu amostras como menor porcentagem de vazios e coeficiente de permeabilidade quando comparada aos demais agregados. Além disso, a partir do procedimento de compactação 18, todos os concretos apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade inferior aos prescritos pelas normas ACI 522R-06 que é de 1,4 mm/s e pela ABNT NBR 16416:2015.

Schaefer *et al.* (2006) após compactação com haste de adensamento em 3 camadas e 25 golpes por camada, aplicaram uma vibração por 5 segundos na mesa vibratória após cada camada de concreto. Considerando a amplitude de vibração de 0,005 polegadas como compactação regular e a amplitude de 0,0034 polegadas como compactação baixa, verificaram as correlações apresentadas na Figura 21.

Figura 21- Efeito da vibração nas propriedades do concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Schaefer *et al.* (2006).

Os resultados constantes na Figura 21 indicam, que para as misturas com 15 a 19% de vazios produzidos com compactação regular, os concretos apresentaram resistência à compressão aos 7 dias entre 20 a 23 MPa e coeficientes de permeabilidade entre 1 a 2 mm/s. Ainda os autores verificaram que durante o ensaio de gelo e degelo, as amostras preparadas com energia de compactação baixa apresentaram ruptura entre o agregado e a pasta, enquanto nas misturas preparadas com energia regular, a ruptura se deu no agregado.

Mahboub *et al.* (2009) analisaram técnicas de preparação de amostras em laboratório e compararam algumas propriedades com amostras extraídas de pavimentos em concreto permeável executados na Universidade de Kentucky, nos Estados Unidos. A resistência à compressão aos 7 dias, coeficiente de permeabilidade e porcentagem de vazios dos concretos moldados e extraídos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades do concreto permeável.

Corpos de prova		Método de Compactação	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)	Porcentagem de vazios
Obtenção	Dimensões				
Moldado	10 x 20 cm	2 camadas – 25 golpes com haste por camada	15,6	0,259	19,35
Moldado	10 x 20 cm	Prensa pneumática (0,07 MPa)	6,1	0,269	31,58
Extraído	10 x 20 cm	Rolo com 148 kg/m (0,6 m de comprimento)	5,9	0,243	29,53

Fonte: Adaptado de Mahboub *et al.* (2009).

Analisando os resultados da Tabela 3 é possível afirmar que o método de adensamento prescritos para pela ASTM C192.14 (2 camadas, 25 golpes por camada) não representa com precisão a compactação das placas feitas com rolo (148 kg/m). Segundo os autores, para reproduzir o método de compactação dos pavimentos em concreto permeável em laboratório pode ser utilizado à prensa pneumática, visto que os resultados entre essas amostras não apresentaram diferença significativa. Além disso, com o aumento da porcentagem de vazios houve uma diminuição na resistência à compressão dos concretos permeáveis.

Putman e Neptune (2011) estudaram em laboratório diferentes técnicas de compactação de corpos de prova com o objetivo de produzir amostras com propriedades semelhantes às extraídas de três pavimentos de concreto permeável em cidades dos Estados Unidos. Desse modo, durante o lançamento do concreto permeável no pavimento, foram preparados corpos de prova cilíndricos de dimensões 150 x 300 mm utilizando diferentes técnicas de adensamento, apresentados no Quadro 5. Também o concreto permeável foi lançado em placas quadradas de espessura 150 mm e tamanho: 300 x 300 mm, 450 x 450 mm e 600 x 600 mm, de modo que fosse possível verificar se as amostras extraídas de placas forneciam resultados mais consistentes que as amostras moldadas em corpos de prova cilíndrico.

Quadro 5- Técnicas de compactação de corpos de prova.

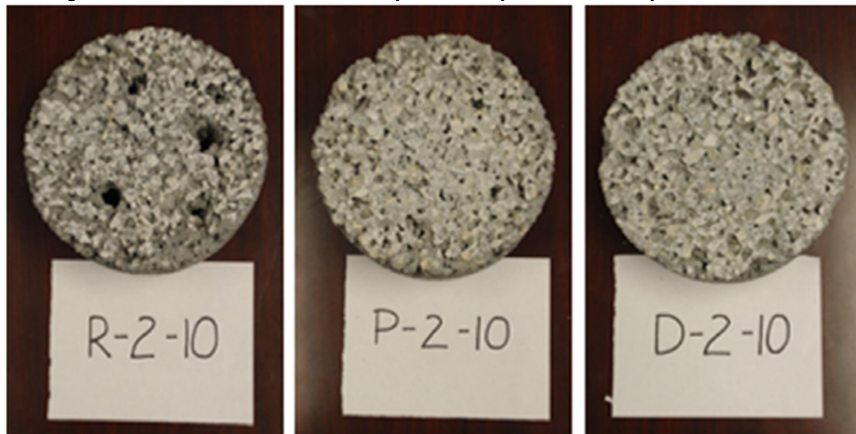
Sigla	Método de compactação em laboratório	Nº de camadas	Nº de golpes por camada
P-2-5	Standard Proctor Hammer - 2,5 kg	2	5
P-2-10	Standard Proctor Hammer - 2,5 kg	2	10
R-2-5	Haste de adensamento de aço - Ø 15,9 mm	2	5
R-2-10	Haste de adensamento de aço - Ø 15,9 mm	2	10
R-2-15	Haste de adensamento de aço - Ø 15,9 mm	2	15
R-2-25	Haste de adensamento de aço - Ø 15,9 mm	2	25
R-3-25	Haste de adensamento de aço - Ø 15,9 mm	3	25
D-2-10	Queda do corpo de prova de altura de 50 mm	2	10

Fonte: Adaptado de Putman e Neptune (2011).

Dos métodos de compactação utilizados em laboratório, os autores concluíram que o martelo Proctor proporcionou menor variabilidade dos resultados e propriedades semelhantes às do pavimento, no entanto, como não foram testados os dois métodos que utilizaram o martelo de Proctor (P-2-5 e P-2-10) para o mesmo concreto, não foi possível dizer qual deles representa melhor as propriedades dos pavimentos. Ainda, verificaram que os corpos de prova extraídos de lajes quadradas de 600 mm apresentaram valores mais consistentes com a densidade e porosidade do pavimento.

Cabe ressaltar, que no estudo feito Putman e Neptune (2011), os autores verificaram que a compactação feita pela haste de adensamento provocou maior variabilidade nos resultados, provavelmente devido à presença de orifícios deixados quando a haste era removida. Na Figura 22 são mostradas as seções transversais dos corpos de prova compactados pelos três métodos R-2-10, P-2-10 e D-2-10.

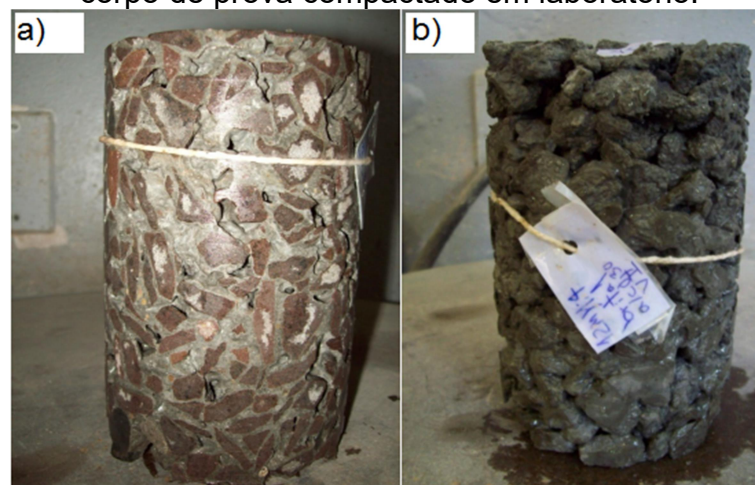
Figura 22- Seção transversal dos corpos de prova compactados em laboratório.



Fonte: Putman e Neptune (2011).

Holtz (2011) verificou que os testemunhos extraídos de placas de concretos permeáveis de traço unitário em massa igual a 1:4 (cimento: agregado graúdo) produzidos com brita 0 e brita 1, apresentaram um coeficiente de permeabilidade inferior aos corpos de prova moldados em laboratório e compactados com vibrador de agulha de diâmetro 25 mm. Na Figura 23 é apresentado o testemunho extraído da placa e o corpo de prova moldado em laboratório, onde é possível observar o arranjo dos agregados graúdos.

Figura 23- Arranjo dos agregados graúdos: a) testemunhos extraídos de placas; b) corpo de prova compactado em laboratório.



Fonte: Holtz (2011).

Segundo os autores, a moldagem em fôrmas cilíndricas causa problemas de acomodação do agregado graúdo, o que favorece a formação de vazios e conseqüentemente o aumento do coeficiente de permeabilidade. Desse modo, as propriedades dos corpos de prova cilíndricos compactados em laboratório

não representam adequadamente as propriedades do pavimento permeável.

Gaedicke, Marines e Miankodila (2014) desenvolveram um método de comparação entre as propriedades de corpos de prova compactados em moldes cilíndricos de dimensões 200 mm x 100 mm e testemunhos de mesmas dimensões extraídos de placas de 864 mm x 712 mm, feitas em uma única camada e compactadas com o rolo (pressão constante de 148 kg/m). Os corpos de prova compactados foram submetidos a diferentes formas de compactação por meio martelo Proctor de 2,5 kg, com uma altura de queda padrão de 300 mm, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6- Procedimentos de compactação de corpos de prova cilíndricos.

Nº de golpes	Nº de camadas	Energia de compactação (J/m ³)
5	2	45400
10	2	90800
20	2	181600
30	2	272400

Fonte: Adaptado de Gaedicke, Marines e Miankodila (2013).

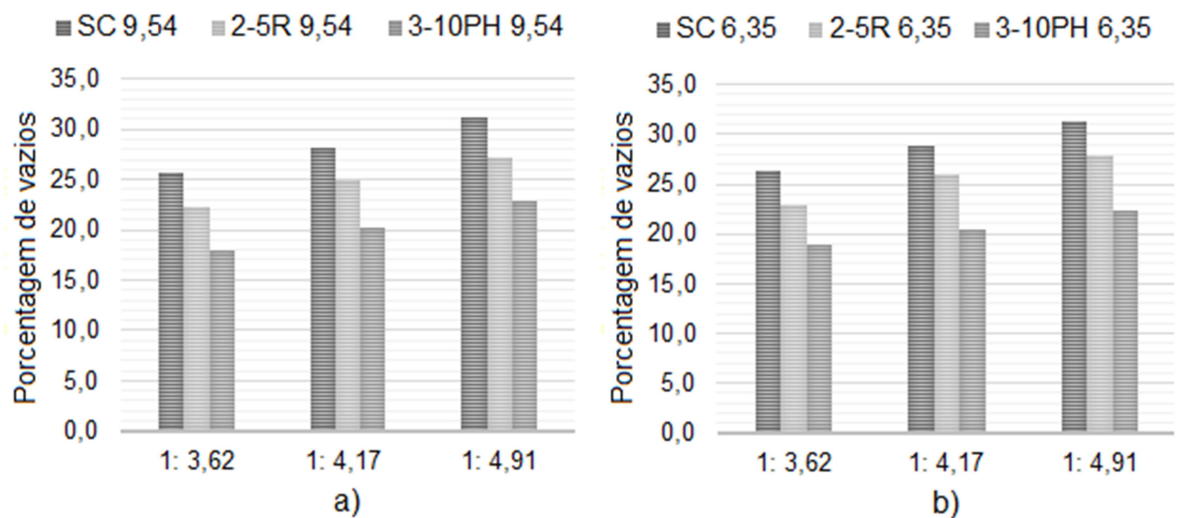
Os resultados experimentais mostraram que para a mesma porcentagem de vazios, os corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório apresentaram em média a mesma massa específica, coeficiente de permeabilidade 20% menor e resistência à compressão 17% menor que os testemunhos extraídos de placas.

Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) analisaram o efeito da energia de compactação sobre corpos de prova de concreto permeável, por meio da aplicação de 5, 10 15 e 20 golpes com o soquete Marshall. Os autores verificaram o crescimento da resistência a tração aos 7 dias das amostras estudadas mediante o aumento do número de golpes durante a compactação dos corpos de prova. Ainda segundo os autores, a energia de 10 golpes pode ser responsável pela relação mais equilibrada entre o desempenho estrutural e a permeabilidade para os traços e método de compactação utilizada.

Torres, Hu e Ramos (2015) estudaram 18 amostras de concreto permeável, resultado da combinação de dois tamanhos de agregados: 9,54 mm e 6,35 mm, três traços unitários (cimento: agregado graúdo de origem calcária): 1: 3,62; 1: 4,17; 1:4,91, ambos com relação a/c igual a 0,33 e três níveis de

compactação: sem compactação (SC), duas camadas compactadas 5 vezes com a haste de adensamento (2-5R) e três camadas adensadas com 10 golpes por camada com o martelo Proctor de 2,5 kg com altura de queda padrão de 300 mm (3-10PH). Os valores da porcentagem de vazios obtidos pelos autores para os dois tamanhos dos agregados graúdos são apresentados na Figura 24.

Figura 24- Efeito do método de compactação na porcentagem de vazios do concreto permeável: a) $D_{m\acute{a}x}=9,54$ mm; b) $D_{m\acute{a}x}=6,35$ mm.

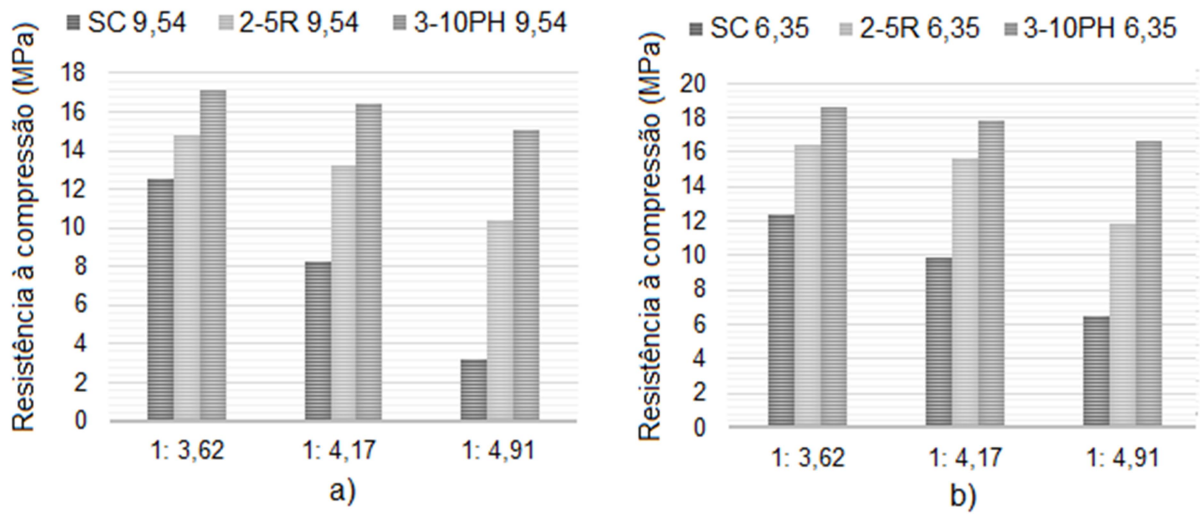


Fonte: Adaptado de Torres, Hu e Ramos (2015).

Os autores verificaram que com o aumento da quantidade de agregado graúdo, houve um aumento da porcentagem de vazios nas misturas para todas as amostras. Além disso, quanto menos compactados foram os corpos de prova, maior foram os valores das porcentagens de vazios. Cabe ressaltar que todas as amostras apresentam valores de porosidade entre 18% e 32%.

A influência sob a resistência à compressão do método de compactação combinado com o tamanho do agregado graúdo para as misturas de concreto permeável obtido por Torres, Hu e Ramos (2015) é apresentada na Figura 25.

Figura 25- Efeito do método de compactação na resistência à compressão do concreto permeável a) $D_{m\acute{a}x}=9,54$ mm; b) $D_{m\acute{a}x}=6,35$ mm.



Fonte: Adaptado de Torres, Hu e Ramos (2015).

Verifica-se que os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos nas amostras com dimensão máxima do agregado graúdo igual a 6,35 mm e nas amostras mais compactadas, ou seja, que utilizaram o método e compactação de Proctor 3-10PH.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais e métodos adotados para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente é apresentada a estratégia de pesquisa adotada e em seguida são descritas detalhadamente as etapas que compõe o estudo.

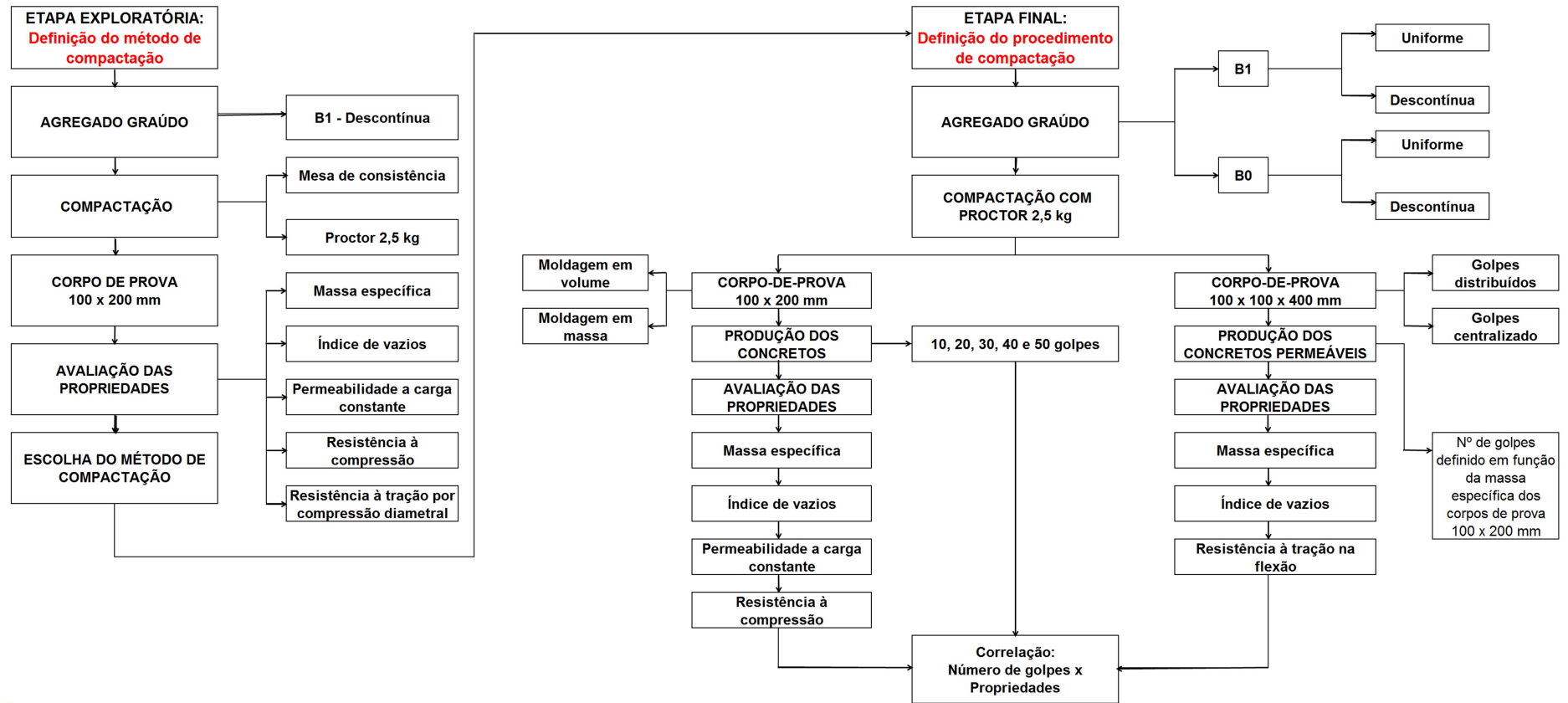
3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O presente estudo dividiu-se em duas etapas. A primeira etapa, denominada Etapa Exploratória, teve como objetivo escolher um método de compactação para a produção de corpos de prova de concreto permeável de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura em laboratório. Nessa etapa optou-se por dois métodos de compactação: cilindro de Proctor de massa igual a 2,5 kg e a mesa de consistência, sugerido por Sandoval (2014). Para esses métodos, trabalhou-se com seis procedimentos de compactação onde houve variação do número de camadas compactadas e número de golpes aplicados nos corpos de prova.

Na segunda etapa, intitulada Etapa Final, após definição do cilindro de Proctor como método de compactação e moldagem em apenas uma camada, verificou-se a necessidade de um estudo mais aprofundado para definir o número de golpes a ser aplicados nos corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e prismáticos de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm, capaz de produzir concretos permeáveis conforme prescrições da ABNT NBR 16416: 2015. Desse modo, nesta etapa, para quatro granulometrias de agregado gráúdo e cinco energias de compactação diferentes, foram produzidas 20 misturas de concreto, que tiveram suas propriedades hidráulicas e mecânicas avaliadas.

A Figura 26 apresenta a estratégia adotada para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Figura 26- Estratégia de pesquisa.



Fonte: Autora (2017).

3.2 ETAPA EXPLORATÓRIA

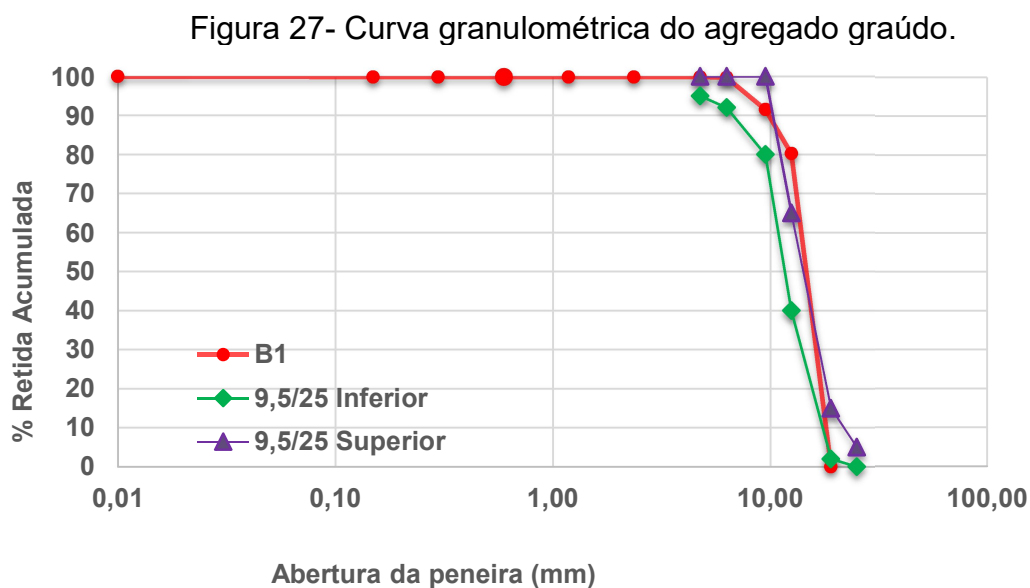
Os materiais e método utilizado para selecionar o método de compactação de corpos de prova de concreto permeável de dimensões 100 mm x 200 mm, são apresentados a seguir.

3.2.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta etapa foram: CP II-Z-32, agregado graúdo de rocha basáltica comercializada em Foz do Iguaçu-PR como brita 1 e água potável.

3.2.1.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto permeável é proveniente da britagem de rochas basálticas por britador de impacto de eixo vertical (VSI - Vertical Shaft Impact). A Figura 27 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo e os limites inferior e superior para a zona granulométrica 9,5/25 prescritos pela ABNT NBR 7211: 2009.



Fonte: Autora (2017).

Pode-se verificar na Figura 27, que o agregado graúdo em estudo está fora dos limites prescritos pela ABNT NBR 7211: 2009 para uso em concretos.

A composição granulométrica foi verificada conforme a ABNT NBR NM 248: 2003, e é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4- Composição granulométrica do agregado graúdo na Etapa Exploratória.

Abertura da peneira (mm)	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada
37,5	0	0
31,5	0	0
25	0	0
19	0	0
12,5	80	80
9,5	11	92
6,3	8	100
4,75	0	100
2,36	0	100
1,18	0	100
0,60	0	100
0,30	0	100
0,15	0	100
FUNDO	100	100
Módulo de finura:	6,92	
Dimensão Máxima Característica:	19 mm	

* Resultado médio de duas determinações.

Fonte: Autora (2017).

Pode-se verificar que o agregado possui módulo de finura igual a 6,92, dimensão máxima característica de 19 mm, sendo comercialmente chamada de brita 1 (B1).

Os resultados dos demais ensaios de caracterização do agregado graúdo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Ensaio de caracterização realizados no agregado graúdo da Etapa Exploratória.

Ensaio	Valores
Massa específica do agregado seco (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,87
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,91
Massa específica aparente (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,99
Absorção de água (%) ABNT NBR NM 53:2009	1,42
Massa unitária solta (g/cm ³) ABNT NBR NM 45: 2006	1,08
Massa unitária compactada (g/cm ³) ABNT NBR NM 45: 2006	1,67
Material fino que passa através da peneira 75 µm (%) ABNT NBR NM 46: 2003	1,45

Fonte: Autora (2017).

De acordo com os limites máximos aceitáveis prescritos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) verifica-se, na Tabela 5, que o agregado graúdo apresenta valor superior ao limite máximo aceitável de material fino passante pela peneira 75 µm que é 1%. No entanto, por ser o objetivo desse estudo utilizar o agregado da região tal como é comercializado, não foi realizado nenhum beneficiamento para eliminar os finos.

3.2.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland do tipo CP II-Z-32 foi escolhido por ser mais utilizado na região de Foz do Iguaçu-PR.

As características do CP II-Z-32 estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6- Características físicas e químicas do CP II-Z-32 da Etapa Exploratória.

Ensaio		Unidade	Média	Desvio Padrão	Limites de Norma
Finura	Área Específica (Blaine)	cm ² /g	3499,00	84,67	≤ 260
	Resíduo na peneira 75 µm	%	2,22	0,35	≤ 12
Tempo de início de pega		min	256	10	≥ 60
Tempo de fim de pega		min	300	7	≤ 480
Expansibilidade a quente		mm	0,36	0,45	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	25,5	0,7	≥ 10
	7 dias de idade	MPa	32,6	1,3	≥ 20
	28 dias de idade	MPa	40,8	0,9	≥ 32
Óxido de magnésio (MgO)		%	3,61	0,26	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		%	2,52	0,10	≤ 4,0
Perda ao fogo (PF)		%	5,34	0,14	≤ 6,5
Resíduo insolúvel (RI)		%	12,16	0,82	≤ 16

Fonte: Fabricante (2015).

3.2.2 Método

Para esta etapa, o trabalho dividiu-se em: produção do concreto em laboratório, compactação dos corpos de prova e avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas.

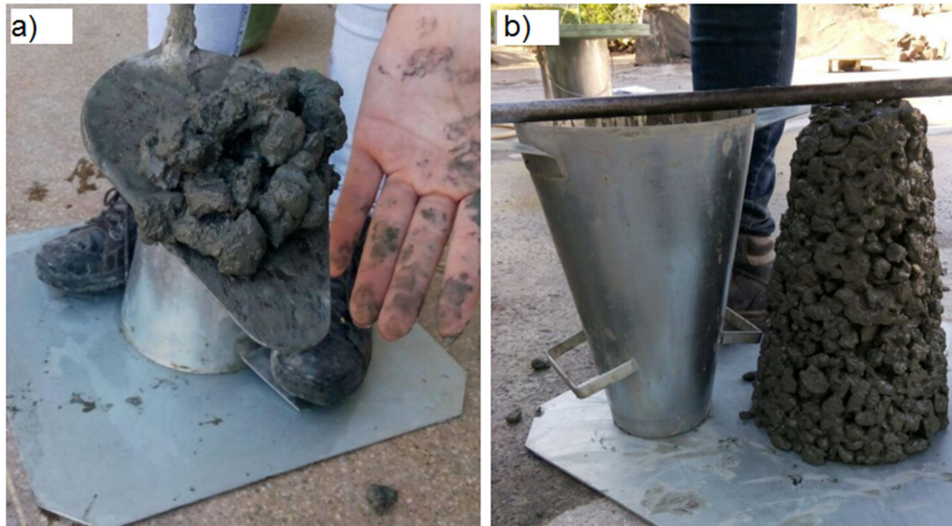
3.2.2.1 Produção do concreto em laboratório

A produção do concreto permeável foi realizada no Laboratório de Tecnologia do Concreto da ITAIPU BINACIONAL, bem como os ensaios no estado fresco e endurecido e seguiu o procedimento proposto por Sandoval (2014), apresentado a seguir:

- 1º) Adição de todo o agregado graúdo e 50% da água;
- 2º) Mistura por 2 minutos;
- 3º) Adição de todo o cimento;
- 4º) Mistura por 1 minuto;
- 5º) Adição do restante da água;
- 6º) Mistura por mais 2 minutos.

Para verificar o teor ótimo de água, realizou-se o teste visual na amostra de concreto permeável e o ensaio de abatimento por meio da NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Figura 28 ilustra o controle do teor de água pelo teste visual e pelo ensaio de abatimento.

Figura 28- Controle do concreto permeável produzido: a) teste Visual; b) ensaio de abatimento.



Fonte: Autora (2017).

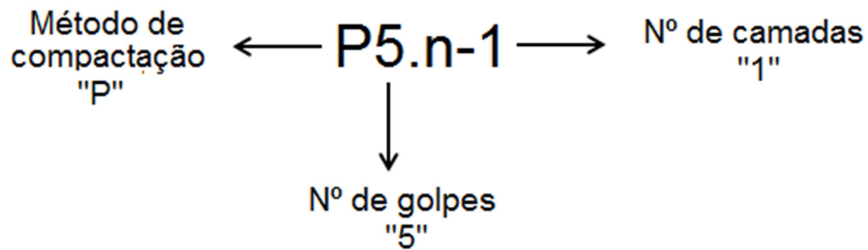
Verifica-se na Figura 28, que a mistura não segregou e nem teve a pasta escorrida para a palma da mão, indicando conforme Tennis, Leming e Akers (2004), a quantidade suficiente de água. Desse modo, padronizou-se a relação água/cimento igual a 0,31 e abatimento igual à zero para todas as misturas avaliadas na Etapa Exploratória.

3.2.2.2 Moldagem e compactação dos corpos de prova

Na Etapa Exploratória, foram estudados seis procedimentos de compactação dos corpos de prova cilíndricos de concreto permeável de dimensões 100 mm x 200 mm. Para identificar cada procedimento, utilizaram-se siglas, onde a letra inicial refere-se ao método de adensamento utilizado, cilindro Proctor – P ou mesa de consistência – MC, seguido pelo número de golpes aplicados com o Proctor ou quedas na mesa de consistência aplicada por camada, e por fim o número de camadas. Por exemplo, a sigla P5.n-1 consiste na compactação realizada por

Proctor de massa igual a 2,5 kg, com 5 golpes por camada, totalizando 1 camada. Na Figura 29 é ilustrada a nomenclatura adotada nessa etapa.

Figura 29- Nomenclatura adotada para identificar os procedimentos de compactação da Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

No Quadro 7 são identificados por siglas os procedimentos de compactação utilizados na Etapa Exploratória.

Quadro 7- Procedimentos de compactação na Etapa Exploratória.

SIGLA	Procedimentos compactação	Nº de golpes ou quedas por camada	Nº de camadas n
P5.n-1	Proctor – 2,5 kg	5	1
P10.n-1	Proctor – 2,5 kg	10	1
P5.n-2	Proctor – 2,5 kg	5	2
P10.n-2	Proctor – 2,5 kg	10	2
MC20.n-1	Mesa de consistência	20	1
MC20.n-2	Mesa de consistência	20	2

Fonte: Autora (2017).

O método de compactação que faz uso do cilindro de Proctor de massa igual a 2,5 kg foi escolhido por ser utilizado por diversos autores em seus estudos sobre concreto permeável, tais como Meininger (1988), Ghafoori e Dutta (1995), Putman e Neptune (2011), Gaedicke, Marines e Miankodila (2014), Torres, Hu e Ramos (2015) e por permitir a operação com menor interferência humana, quando comparado à haste de adensamento, equipamento utilizado na moldagem dos corpos de prova com concreto convencional. O procedimento foi realizado do seguinte modo: o corpo de prova cilíndrico de dimensões 100 mm x 200 mm, foi preenchido com concreto sem controle de massa e recebeu pela queda do soquete o número de golpes correspondente a cada procedimento. Posteriormente,

procedeu-se o rasamento com colher de pedreiro, eliminando o material em excesso.

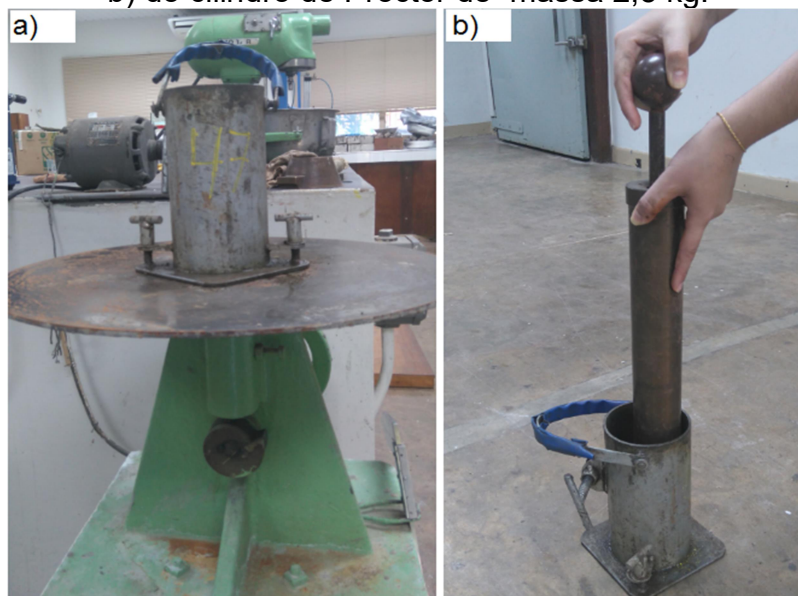
O número de golpes aplicado por camada com o Proctor de 2,5 kg limitou-se a 10 golpes, pois durante a compactação o concreto permeável aparentava, visualmente, estar bem compactado e com poucos vazios.

O método de compactação que fez uso da mesa de consistência foi escolhido por ter sido utilizado por Sandoval (2014), também com o objetivo de diminuir a interferência humana na realização da compactação. O procedimento consistiu em preencher o corpo de prova com o concreto e colocá-lo centralizado sobre a mesa de consistência. Acionou-se a manivela de modo que a mesa subisse e caíssem 20 golpes em 20 segundos e posteriormente fez-se o rasamento com colher de pedreiro. O corpo de prova foi fixado na mesa de consistência com o auxílio de um sargento.

A escolha por compactar em apenas 1 camada, diferente do realizado por Sandoval (2014), justifica-se, pois, o autor identificou a ruptura na interface das camadas compactadas e por reproduzir a compactação que ocorre nos pavimentos.

Na Figura 30, é ilustrado como foi realizada a compactação pelos dois métodos: mesa de consistência e cilindro de Proctor.

Figura 30- Compactação dos corpos de prova com uso: a) da mesa de consistência; b) do cilindro de Proctor de massa 2,5 kg.



Fonte: Autora (2017).

Cabe ressaltar que em todos os procedimentos de compactação para preenchimento da última camada utilizou-se o funil metálico, de modo que após a compactação ainda houvesse excesso de concreto para fazer o rasamento do topo.

Durante as primeiras 24 horas todos os corpos de prova foram armazenados em local protegido de intempéries e cobertos por uma placa de vidro, com a finalidade de evitar a perda de água no concreto. Após esse período, foram identificados e armazenados até a idade de 21 dias em câmara úmida à temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos de prova foram rompidos com 21 dias de idade, pois o objetivo da Etapa Exploratória, era subsidiar a escolha do método de compactação (Proctor e Mesa de consistência) por meio da comparação entre suas propriedades.

3.2.2.3 Planejamento experimental e descrição dos ensaios

No Quadro 8 é apresentado o planejamento experimental da Etapa Exploratória, onde consta o ensaio, a metodologia utilizada e a quantidade, dimensões e formato dos corpos de prova avaliados.

Quadro 8- Planejamento experimental da Etapa Exploratória.

Ensaio	Método	Corpos de prova		
		Quantidade	Dimensões (mm)	Formato
Massa específica no estado fresco	ABNT NBR 9833:2009	7*	100 x 200	Cilíndrico
Massa específica no estado endurecido	ABNT NBR 9778:2009	7*	100 x 200	Cilíndrico
Porcentagem de vazios	Sandoval (2014)	7*	100 x 200	Cilíndrico
	Batezini (2013)	7*	100 x 200	Cilíndrico
Permeabilidade a carga constante	Sandoval (2014)	7*	100 x 200	Cilíndrico
Resistência à compressão aos 21 dias	ABNT NBR 5739: 2007	4	100 x 200	Cilíndrico
Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias	ABNT NBR 7222: 2011	3	100 x 200	Cilíndrico

* Mesmos corpos de prova.

Fonte: Autora (2017).

3.2.2.3.1 Massa específica no estado fresco e endurecido

Os ensaios de massa específica no estado fresco e endurecido dos corpos de prova de concreto foram realizados, respectivamente, conforme as prescrições NBR 9833 (ABNT, 2009) e NBR 9778 (ABNT, 2009), no entanto o recipiente utilizado foi o corpo de prova cilíndrico e o adensamento seguiu os procedimentos descritos no Item 3.2.2.2. Por meio da Equação 6, tem-se a massa específica no estado fresco ou endurecido.

$$\rho = \frac{m-m_r}{V_r} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ρ = massa específica do concreto fresco ou endurecido, em kg/m³;

m = massa do recipiente com o concreto, em kg;

m_r = massa do recipiente, em kg;

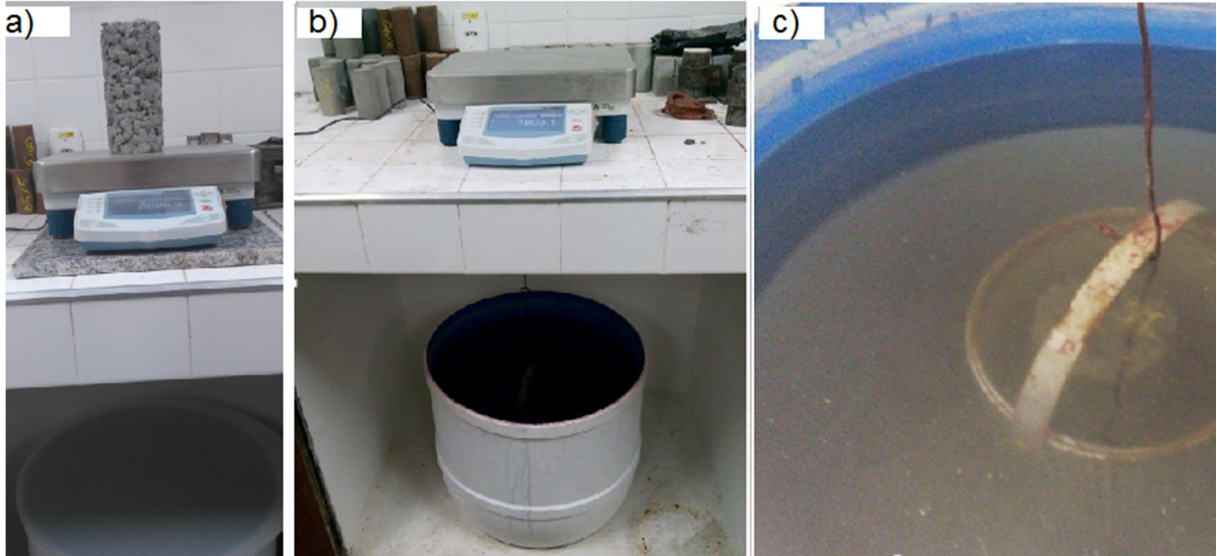
V_r = volume interno do recipiente, em m³.

3.2.2.3.2 Porcentagem de vazios

A porcentagem de vazios do concreto permeável foi determinada em laboratório a partir de dois métodos volumétricos, com a finalidade de definir qual deles seria utilizado na Etapa Final.

O primeiro método, denominado neste trabalho como Método utilizado por Batezini (2013), consistiu em efetuar a pesagem dos corpos de prova na condição SSS e a pesagem hidrostática, conforme ilustrado na Figura 31. Por meio da Equação 2 (item 2.3.2.1), pode-se calcular a porcentagem de vazios nos concretos permeáveis, também denominada por alguns autores como porosidade aberta.

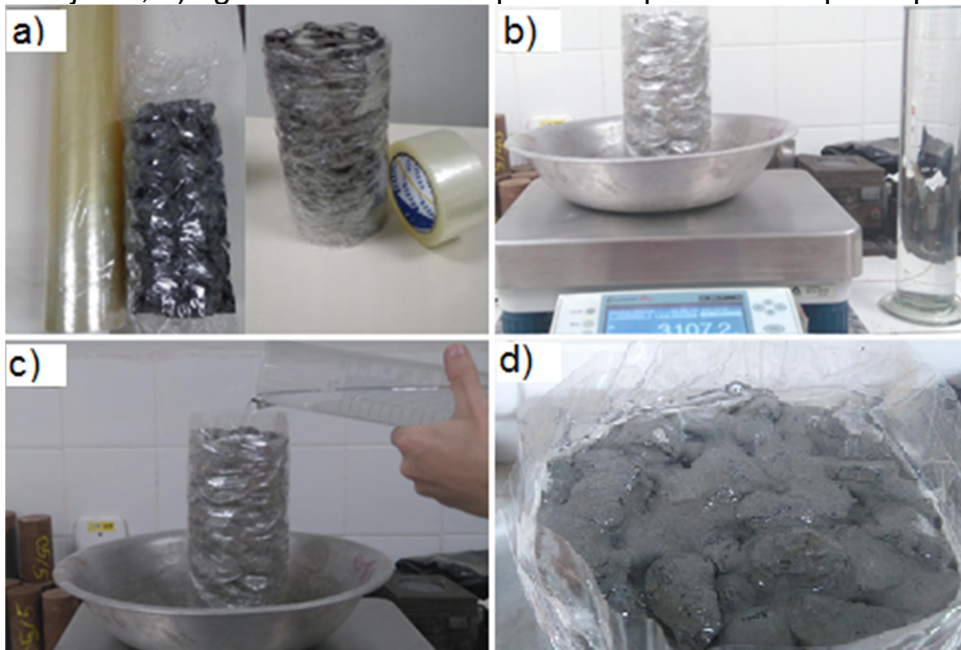
Figura 31- Medição dos vazios: a) Pesagem do corpo de prova em condição SSS; b) Pesagem hidrostática do corpo de prova; c) Corpo de prova submerso.



Fonte: Autora (2017).

O segundo método, denominado como Método utilizado por Sandoval (2014), é ilustrado na Figura 32.

Figura 32- Medição dos vazios: a) vedação do corpo de prova com filme plástico; b) pesagem do corpo de prova; c) preenchimento dos vazios com água e pesagem do conjunto; d) água aflorando na superfície superior do corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

O procedimento consistiu em envolver o corpo de prova também na condição SSS com plástico filme e fita adesiva transparente de modo a vedar as laterais e sua superfície inferior (Fig. 32 a). Após sua pesagem (Fig. 32 b) foi

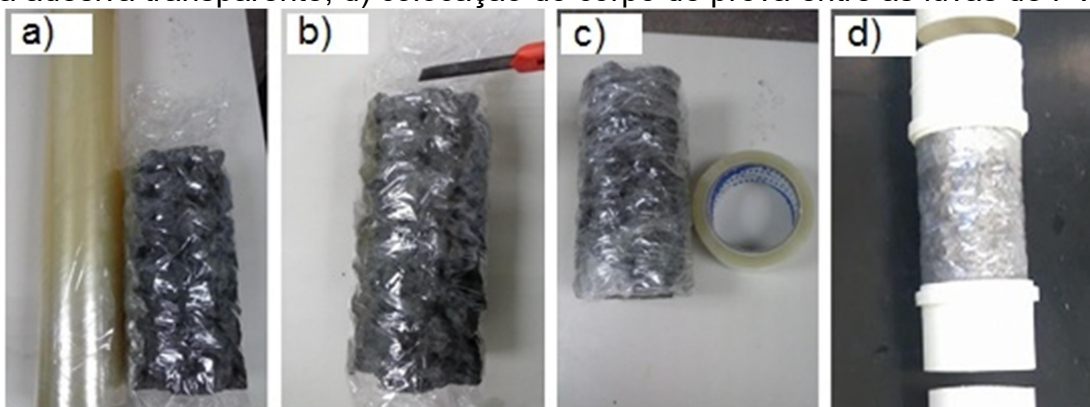
adicionado água ao corpo de prova até o preenchimento dos vazios (Fig.32 c) e aparecimento da água na superfície superior (Fig. 32 d), para posteriormente efetuar a pesagem do conjunto corpo de prova com água. A porcentagem de vazios dos concretos permeáveis foi calculada por meio da aplicação da Equação 4 (item 2.3.2.1).

3.2.2.3.3 Permeabilidade

Para verificar o coeficiente de permeabilidade (k) dos concretos permeáveis montou-se um permeâmetro de carga constante, conforme sugerido por Sandoval (2014), com tubos e conexões em PVC (Polyvinyl chloride).

A preparação da amostra de concreto permeável deu-se do seguinte modo: o corpo de prova foi envolto em filme plástico (Fig. 33 a) e o excesso foi cortado de modo que suas extremidades ficassem livres para passagem da água (Fig. 33 b). Realizou-se a passagem da fita adesiva transparente (Fig. 33 c) e fixação entre as luvas de PVC esgoto de 100 mm para colocação no permeâmetro (Fig. 33 d). Na Figura 33 é ilustrada a preparação dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade.

Figura 33- Preparação dos corpos de prova para ensaio de permeabilidade: a) colocação do filme plástico; b) corte do excesso do plástico filme; c) passagem de fita adesiva transparente; d) colocação do corpo de prova entre as luvas de PVC.



Fonte: Autora (2017).

Após a colocação do corpo de prova no permeâmetro, adicionou-se água pela parte superior do permeâmetro com auxílio de uma mangueira, aberta até sua vazão máxima. Com o nível constante de água sobre a amostra garantida pelo

escoamento da água pelo tubo extravasor, fez-se a coleta da água passante pelo corpo de prova em trinta segundos e um minuto, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34- Ensaio no permeâmetro de carga constante.



Fonte: Autora (2017).

Cabe ressaltar que para garantir a estanqueidade durante a realização do ensaio, ou seja, que a água percolasse apenas pelo corpo de prova, colocou-se fita filme de polietileno reforçado com tecido laminado de algodão em torno da amostra. Por meio da Equação 5 (Item 2.3.2.2) calculou-se o coeficiente de permeabilidade.

3.3 ETAPA FINAL

O objetivo da Etapa Final foi propor um procedimento de compactação em laboratório para corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm e prismáticos de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm, e verificar a influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

Os ensaios realizados durante essa etapa foram desenvolvidos nos Laboratórios de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, em Foz do Iguaçu – PR.

3.3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta etapa, bem como as siglas adotadas para os agregados graúdos foram:

- CP II-Z-32;
- Agregado graúdo de basalto com dimensão máxima característica igual a 19 mm e granulometria descontínua, comercializada em Foz do Iguaçu como brita 1 (B1–D);
- Agregado graúdo de basalto com dimensão máxima característica igual a 19 mm e granulometria uniforme, obtida mediante peneiramento da brita 1 (B1–U);
- Agregado graúdo de basalto com dimensão máxima característica igual a 12,5 mm e granulometria descontínua, obtida mediante peneiramento da brita 1 (B0–D);
- Agregado graúdo de basalto com dimensão máxima característica igual a 12,5 mm e granulometria uniforme, obtida mediante peneiramento da brita 1 (B0–U).
- Água potável.

Cabe ressaltar que neste trabalho, entende-se como granulometria descontínua aquela que apresenta a ausência de uma ou mais frações em sua curva de distribuição granulométrica e granulometria uniforme aquela que apresenta grãos de tamanho único.

3.3.1.1 Agregados graúdos

Com o intuito de verificar a influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, trabalhou-se com a brita 1 proveniente de rocha basáltica comercializada

em Foz do Iguaçu e outras três granulometrias obtidas mediante o peneiramento da mesma.

Como o lote utilizado na Etapa Exploratória foi utilizado totalmente, houve a necessidade de adquirir um novo lote de agregado, desse modo, na Tabela 7 é apresentada a composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados nesta etapa conforme ABNT NBR NM 248:2003, o módulo de finura e dimensão máxima característica.

Tabela 7- Composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados na Etapa Final.

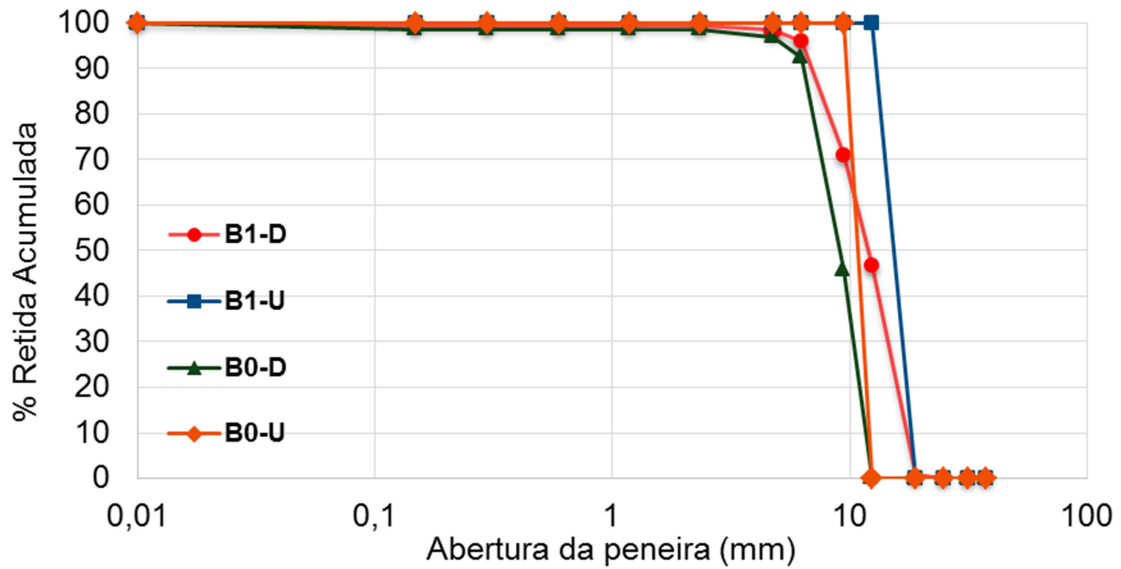
Abertura da peneira (mm)	B1-D		B1-U		B0-D		B0-U	
	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada
37,5	0	0	0	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
12,5	46	47	100	100	0	0	0	0
9,5	24	71	0	100	46	46	100	100
6,3	25	96	0	100	47	92	0	100
4,75	2	98	0	100	4	97	0	100
2,36	1	99	0	100	2	99	0	100
1,18	0	99	0	100	0	99	0	100
0,60	0	99	0	100	0	99	0	100
0,30	0	99	0	100	0	99	0	100
0,15	0	99	0	100	0	99	0	100
Dimensão Máxima Característica	19 mm		19 mm		12,5 mm		12,5 mm	
Módulo de Finura	6,65		7,00		6,35		7,00	

* Resultado médio de duas determinações.

Fonte: Autora (2017).

Na Figura 35, podem ser visualizadas as curvas granulométricas dos agregados graúdos provenientes de rocha basáltica utilizados na Etapa Final.

Figura 35- Curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados na Etapa Final.



Fonte: Autora (2017).

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados para os agregados graúdos se encontram na Tabela 8.

Tabela 8- Caracterização dos agregados graúdos da Etapa Final.

Ensaio	B1-D	B1-U	B0-D	B0-U
Massa específica do agregado seco (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,86	2,86	2,86	2,86
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,90	2,90	2,90	2,90
Massa específica aparente (g/cm ³) ABNT NBR NM 53:2009	2,98	2,98	2,98	2,98
Absorção de água (%) ABNT NBR NM 53:2009	1,50	1,50	1,50	1,50
Massa unitária solta (g/cm ³) ABNT NBR NM 45: 2006	1,77	1,62	1,60	1,58
Massa unitária compactada (g/cm ³) ABNT NBR NM 45: 2006	1,90	1,74	1,72	1,69
Material fino que passa através da peneira 75 µm (%) ABNT NBR NM 46: 2003	0,89	0,40	0,50	0,40
Índice de forma ABNT NBR 7809:2008	1,92	1,86	1,97	1,97

Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que a quantidade de material fino passante pela peneira 75 μm é inferior aos limites prescritos pela ABNT NBR 7211: 2009 que é de 1,0%, assim como o índice de forma, onde para todas os agregados os valores obtidos foram inferiores a 3.

Com relação à massa unitária solta e compactada, os agregados uniformes apresentam valores menores que os agregados descontínuos, devido à presença de um maior índice de vazios entre os grãos.

3.3.1.2 Cimento

O cimento CP II-Z-32 tem massa específica média igual a 2,98 g/cm³ e atende a NBR 11578 (ABNT, 1997).

Para a conclusão da Etapa Final, houve a necessidade da aquisição de nova quantia de cimento, que por ser de lote diferenciado do material utilizado na etapa anterior, tem sua caracterização apresentada na Tabela 9.

Tabela 9- Características físicas e químicas do CP II-Z-32 utilizado na Etapa Final.

Ensaio		Unidade	Média	Desvio Padrão	Limites de Norma
Finura	Área Específica (Blaine)	cm ² /g	3604,00	74,86	≤ 260
	Resíduo na peneira 75 μm	%	2,19	0,38	≤ 12
Tempo de início de pega		min	260	10	≥ 60
Tempo de fim de pega		min	306	10	≤ 480
Expansibilidade a quente		mm	0,30	0,26	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	24,0	0,9	≥ 10
	7 dias de idade	MPa	30,0	0,9	≥ 20
	28 dias de idade	MPa	39,0	1,0	≥ 32
Óxido de magnésio (MgO)		%	3,72	0,05	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		%	2,54	0,06	≤ 4,0
Perda ao fogo (PF)		%	5,03	0,20	≤ 6,5
Resíduo insolúvel (RI)		%	11,06	0,34	≤ 16

Fonte: Fabricante (2016).

3.3.2 Método

O traço e mistura dos concretos permeáveis, o método utilizado para definir o procedimento de moldagem e compactação para corpos de prova cilíndrico e prismáticos, a produção e cura dos concretos, são apresentados a seguir, juntamente com o planejamento experimental e a descrição dos ensaios.

3.3.2.1 Traço e mistura dos concretos permeáveis

Para esta etapa manteve-se o traço em massa da Etapa Exploratória: 1:3,26 (cimento: agregado graúdo). A mistura dos materiais para a produção do concreto permeável se deu na betoneira de eixo inclinado e capacidade para 250 litros conforme ordem proposta por Sandoval (2014).

O controle das misturas de concreto permeável foi realizado por meio do ensaio de abatimento prescrito pela ABNT NBR NM 68: 1998 e por meio da avaliação visual proposta por Tennis, Leming e Akers (2004). Fixou-se o abatimento igual a zero como padrão, além da mistura não poder apresentar excesso de pasta e nem segregar na palma da mão. Para garantir essas condições, utilizou-se uma relação água/cimento igual a 0,31.

3.3.2.2 Moldagem e compactação

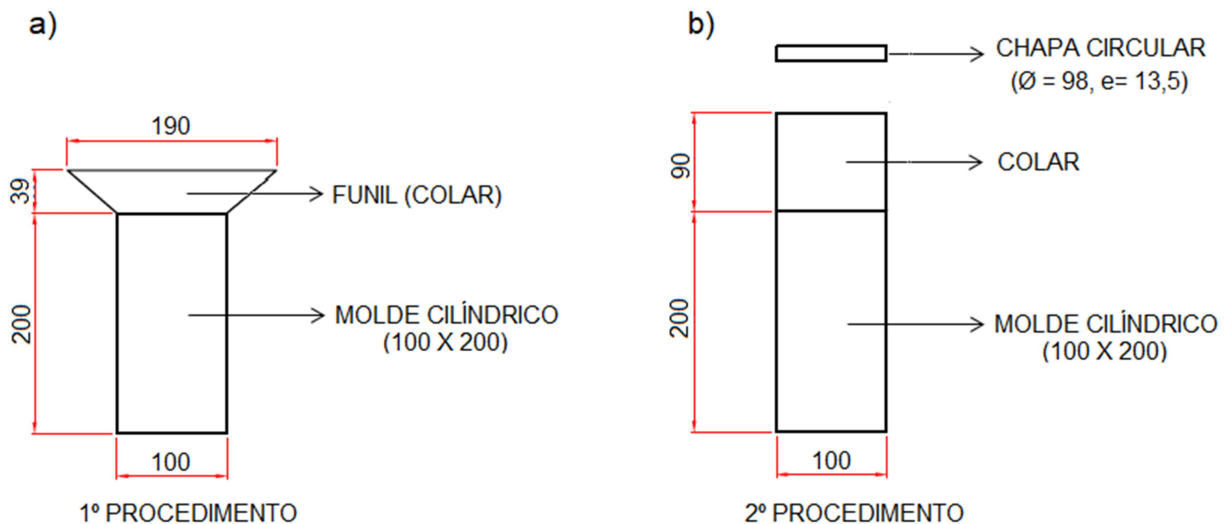
Esta etapa teve como objetivo, verificar a influência dos procedimentos de moldagem e compactação sobre a massa específica no estado fresco do concreto permeável. A partir dos resultados obtidos, escolheu-se o procedimento de moldagem e compactação para a produção dos concretos na Etapa Final.

Os procedimentos realizados para definição da forma de moldagem e compactação dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos na Etapa Final são descritos a seguir.

3.3.2.2.1 Corpos de prova cilíndricos

Para os corpos de prova cilíndricos, foram avaliados duas formas de enchimento dos moldes com concreto: sem controle da massa lançada, por isso chamado neste trabalho de “moldagem em volume”, e com padronização da quantidade de massa, denominado como “moldagem em massa”. Na Figura 36 são esquematizados os dois procedimentos de moldagem dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 36- Procedimentos de moldagem dos corpos de prova cilíndricos:
a) moldagem em volume; b) moldagem em massa.



Nota: Desenho sem escala; Medidas em mm.

Fonte: Autora (2017).

No primeiro procedimento, com o auxílio de uma concha e de um funil (colar), fez-se o enchimento do corpo de prova com concreto, sem controle de massa (Fig. 37 a). Realizou-se a compactação com o cilindro de Proctor com massa igual a 2,5 kg de forma distribuída na seção transversal do concreto (Fig. 37 b). Após a compactação fez-se o rasamento com a colher de pedreiro (Figura 37 c) e a pesagem do conjunto para cálculo da massa específica no estado fresco, conforme Equação 6 (item 3.2.2.3.1). Na Figura 37, é ilustrado o procedimento de moldagem em volume dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 37- Procedimento de moldagem em volume dos corpos de prova cilíndricos: a) enchimento do molde; b) compactação; c) rasamento; d) corpo de prova no molde pronto para ensaio de massa específica.



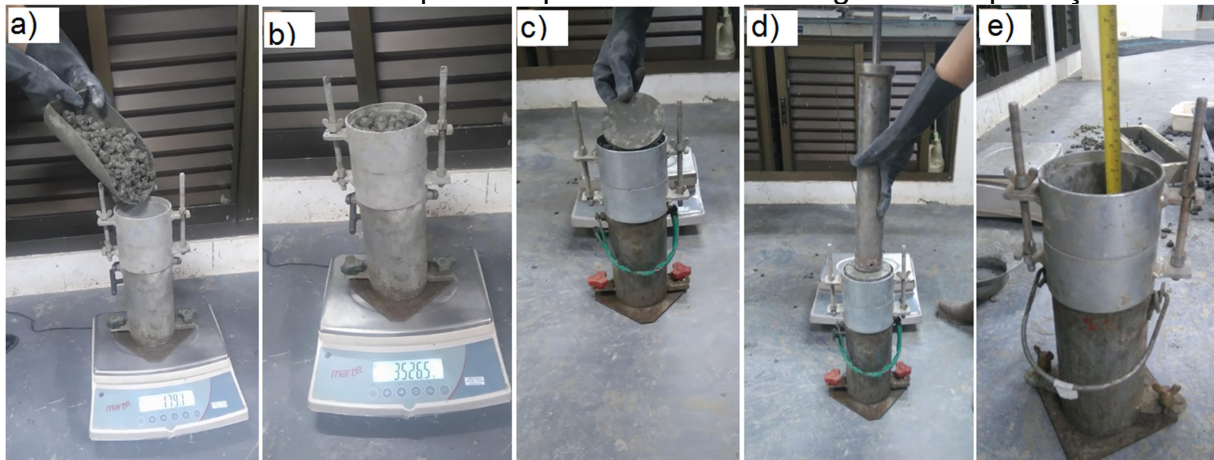
Fonte: Autora (2017).

A partir da execução deste procedimento, verificou-se a necessidade da troca do funil por outro dispositivo que permitisse a compactação uniforme do concreto, por isso o funil foi substituído por dois colares utilizados no ensaio de Proctor (altura igual a 90 mm). Também, fez-se uso de uma chapa circular com diâmetro de 98 mm, espessura igual a 13,5 mm e massa igual a 760 g, para garantir que o concreto descesse niveladamente após cada golpe e permitisse a distribuição mais uniforme da energia de compactação sobre a seção transversal do concreto.

No segundo procedimento, fez-se o enchimento do corpo de prova com concreto (Fig. 38 a) até a obtenção da massa igual a 3500 ± 100 g (Fig. 37 b). Posteriormente colocou-se a chapa circular sobre a massa de concreto (Fig. 38 c) para início da compactação com o cilindro de Proctor de massa igual a 2,5 kg. Os golpes foram aplicados no centro da chapa circular (Fig. 38 d). Após a compactação realizou-se a medição da altura de concreto compactado (Fig. 38 e), para que fosse possível calcular o volume final do concreto, necessário para obter a energia de compactação aplicada no corpo de prova.

Na Figura 38, é ilustrado o procedimento de moldagem em massa dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 38- Procedimento de moldagem em massa dos corpos de prova cilíndricos: a) enchimento do molde; b) controle da massa de concreto; c) colocação da chapa circular sobre o concreto; d) compactação com o cilindro de Proctor; e) medição da altura do concreto compactado para cálculo da energia de compactação.



Fonte: Autora (2017).

Com a massa do soquete, número de camadas, número de golpes aplicados por camada, altura de queda do soquete e volume final do concreto após compactação, foi possível calcular a energia de compactação aplicada por meio da Equação 7. A altura do soquete é padronizada e igual a 30,5 cm.

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

Equação 7

Onde:

E- Energia de compactação (J/m³);

P - Massa do soquete (kg);

h- Altura de queda do soquete (m);

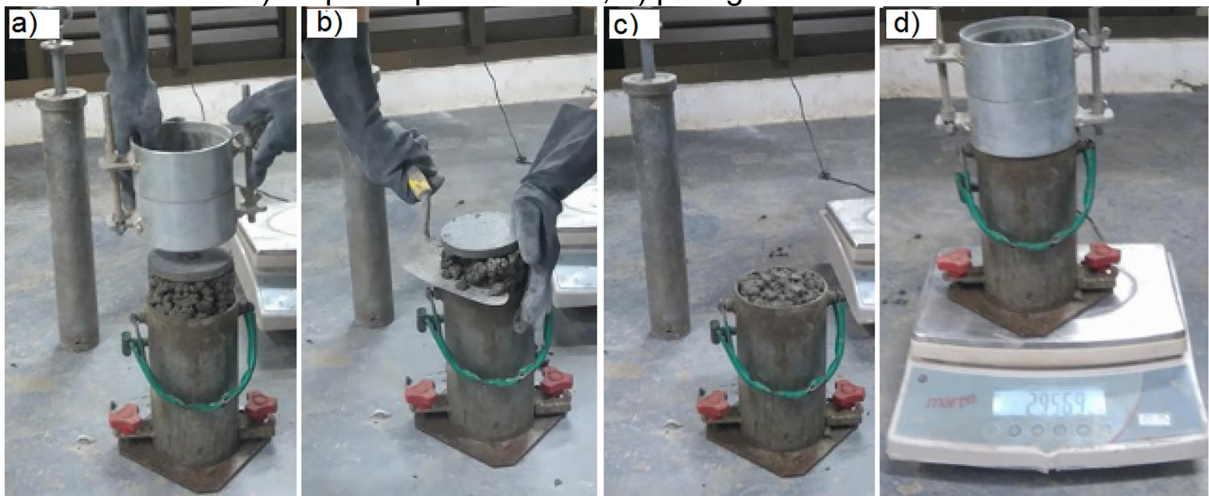
N- Número de golpes por camada;

n- Número de camadas;

V- Volume final do concreto após compactação (m³).

Na Figura 39 é ilustrado o procedimento adotado para a obtenção da massa específica no estado fresco dos concretos, onde para cálculo da massa específica pela Equação 6 (Item 3.2.2.3.1), os dois moldes foram retirados (Fig. 39 a) para rasamento do corpo de prova com a colher de pedreiro (Fig. 39 b) e com o corpo de prova rasado (Fig. 39 c), colocou-se novamente os moldes para pesagem do concreto (Fig. 39 d).

Figura 39- Ensaio de massa específica no estado fresco dos corpos de prova cilíndricos: a) retirada dos moldes; b) rasamento do concreto com colher de pedreiro; c) corpo de prova rasado; d) pesagem do concreto.



Fonte: Autora (2017).

Após a verificação das massas específicas pelos dois procedimentos de moldagem, os corpos de prova com concreto ainda no estado fresco foram descartados.

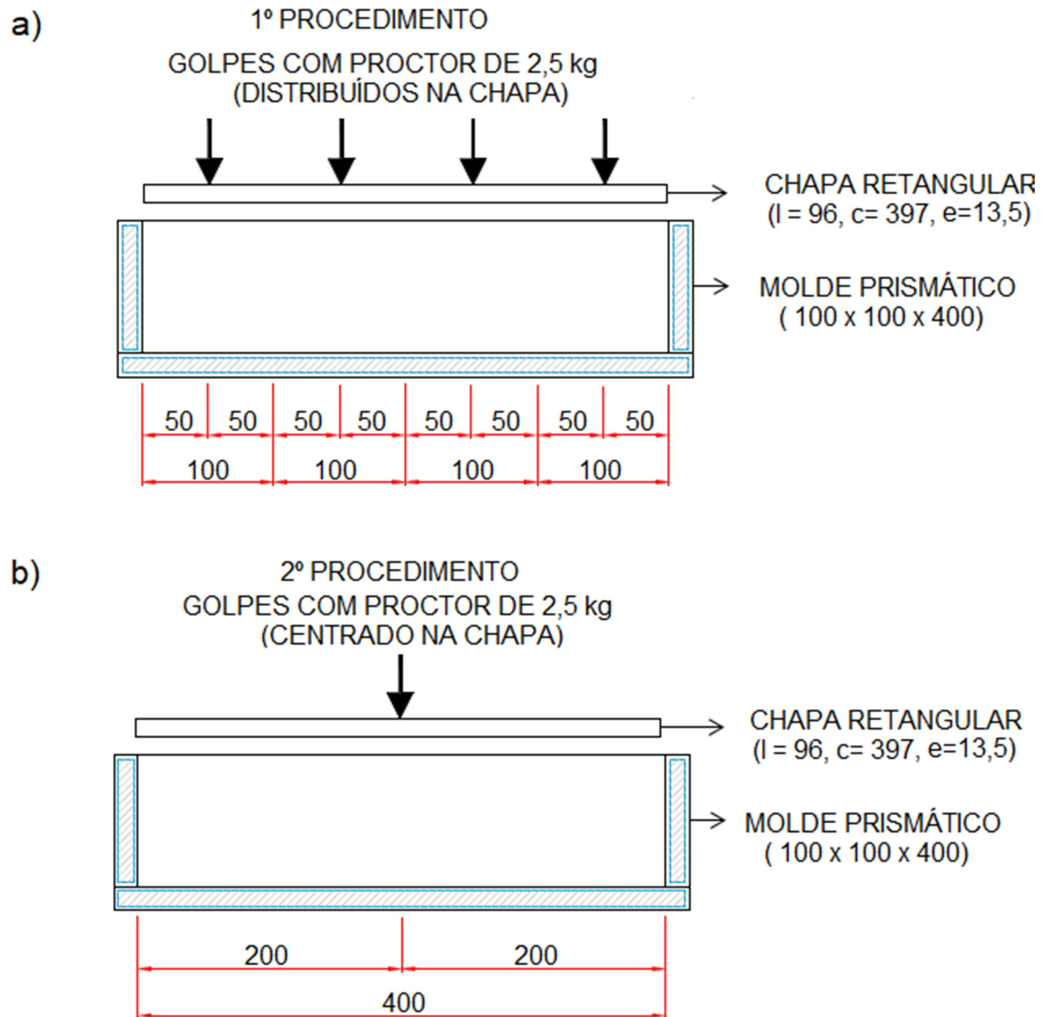
3.3.2.2.2 Corpos de prova prismáticos de dimensões 100 x 100 x 400 mm

Para os corpos de prova prismáticos, avaliaram-se duas formas de compactação, com aplicação dos golpes de Proctor de massa igual a 2,5 kg de modo distribuído na chapa metálica e centrado, esquematizados na Figura 40.

Os dois procedimentos de compactação tiveram os corpos de prova prismáticos moldados do mesmo modo. Padronizou-se o enchimento dos corpos de prova com 9500 ± 100 g de concreto, quantidade suficiente para garantir massas específicas no estado fresco superiores a 2000 kg/m^3 para todas as granulometrias estudadas.

Para garantir que toda essa massa de concreto fosse compactada, produziu-se um colar de madeira. A altura do colar foi obtida por meio da aplicação de uma regra de três simples: considerando que para o corpo de prova cilíndrico de altura 200 mm foi utilizado dois colares que totalizaram uma altura de 90 mm, para o corpo de prova prismático com altura de 100 mm, utilizou-se um colar de altura de 45 mm.

Figura 40- Procedimentos de compactação dos corpos de prismáticos com aplicação dos golpes de Proctor na chapa metálica de modo: a) distribuído; b) centrado.



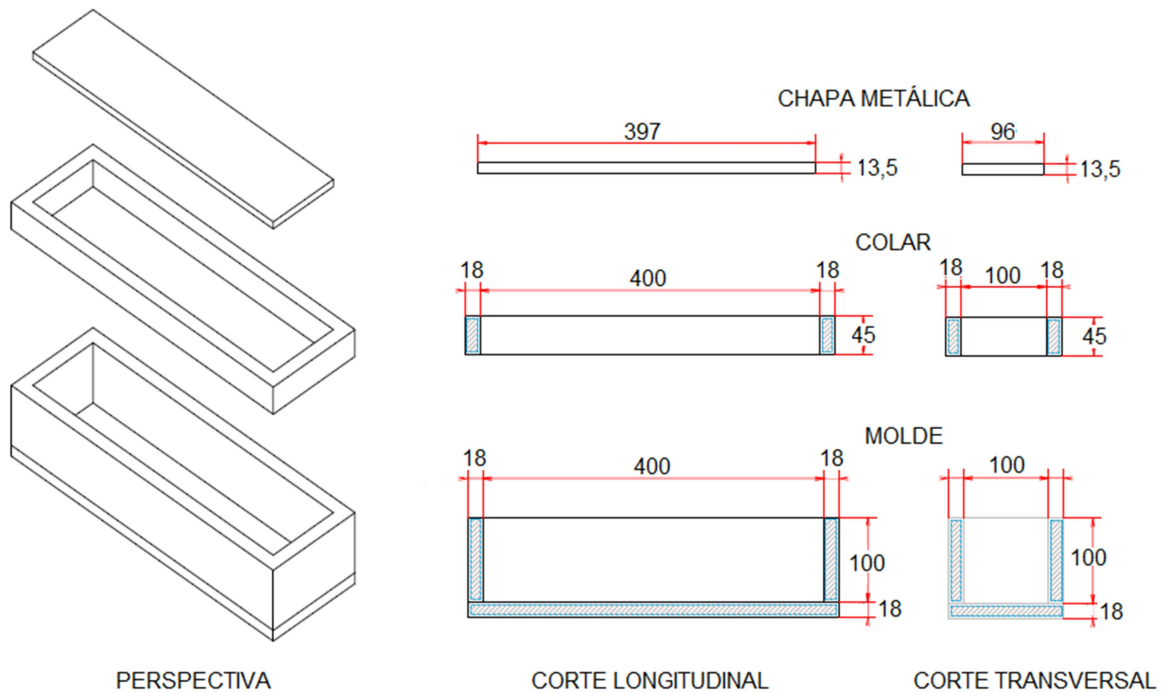
Nota: Desenho sem escala; Medidas em mm.

Fonte: Autora (2017).

Para a compactação, utilizou-se sobre o concreto uma chapa metálica com 96 mm de largura, 397 mm de comprimento e 13,5 mm de espessura.

A chapa metálica, colar e molde, utilizados para a moldagem dos corpos de prova prismáticos são esquematizados na Figura 41.

Figura 41- Chapa metálica, colar e molde utilizados para a moldagem dos corpos de prova prismáticos.

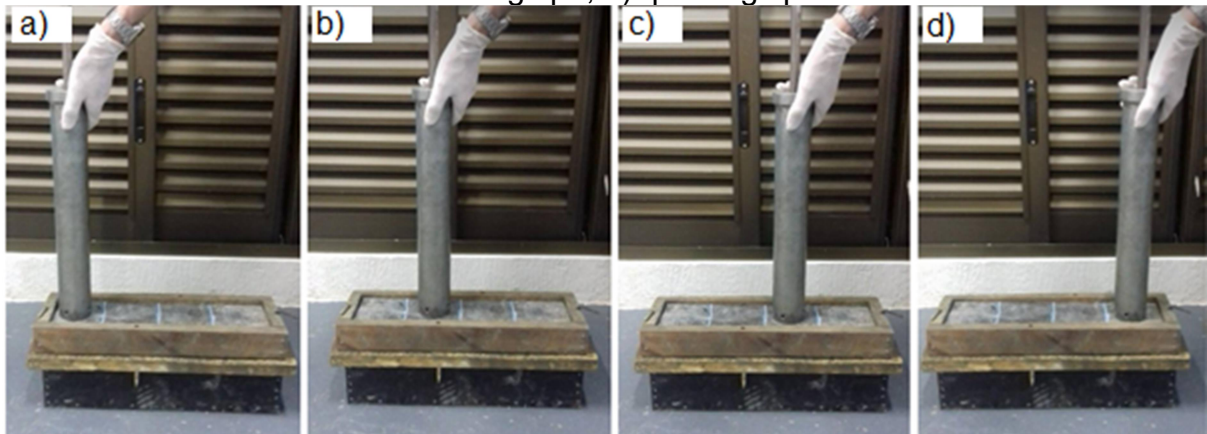


Nota: Desenho sem escala; Medidas em mm.

Fonte: Autora (2017).

No primeiro procedimento, com o Proctor de 2,5 kg, aplicaram-se na chapa metálica os golpes a cada 10 cm do seu comprimento, ou seja, de modo distribuído na seção transversal do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42- Compactação dos corpos de prova prismático com aplicação dos golpes de modo distribuído na chapa metálica: a) primeiro golpe; b) segundo golpe; c) terceiro golpe; d) quarto golpe



Fonte: Autora (2017).

Finalizada a compactação, efetuou-se a medição com a trena metálica da altura final do concreto (Figura 43), para cálculo da energia de compactação por meio da aplicação da Equação 7 (Item 3.3.2.2.1).

Figura 43- Medição da altura final do concreto permeável após compactação para cálculo da energia de compactação.



Fonte: Autora (2017).

Posteriormente, fez-se a retirada do colar e o rasamento com colher de pedreiro para cálculo da massa específica por meio da aplicação da Equação 6 (item 3.2.2.3.1).

No segundo procedimento de compactação, a aplicação dos golpes deu-se apenas no centro da chapa metálica, conforme ilustrado na Figura 44.

Figura 44- Compactação dos corpos de prova prismático com aplicação dos golpes no centro da chapa metálica.



Fonte: Autora (2017).

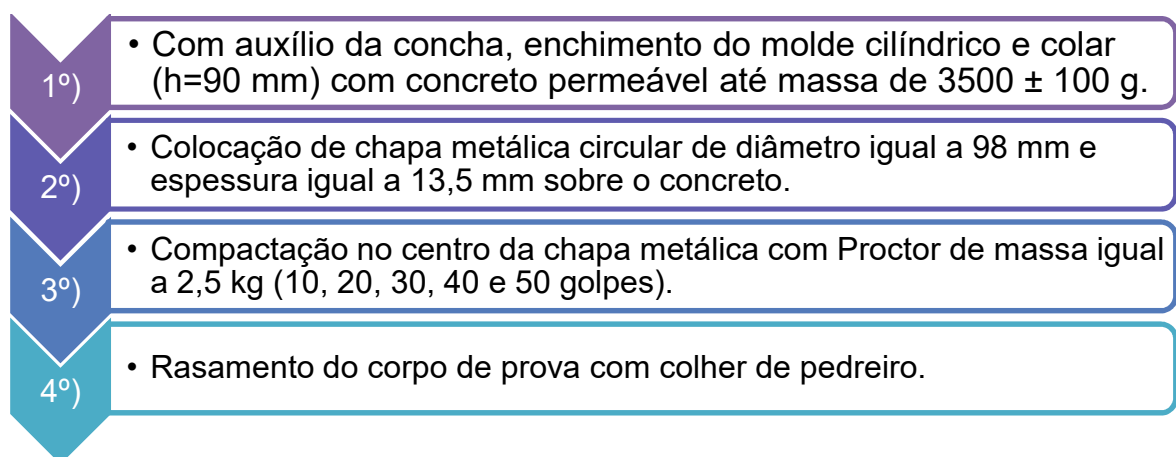
Após a compactação dos corpos de prova prismáticos realizou-se a medição da altura final do concreto para cálculo da energia de compactação, e rasamento para cálculo da massa específica, conforme procedimento anterior.

3.3.2.2.3 Procedimentos de moldagem e compactação adotados na Etapa Final

Comparando os dois procedimentos de compactação dos corpos de prova cilíndricos, verificou-se que com o controle da massa de concreto lançado nos moldes, produziram-se concretos permeáveis com massas específicas maiores, o que pode ser justificado pela compactação causada pelo próprio concreto durante o lançamento, e menor variação dos resultados. Além disso, o número de golpes necessário para atingir a massa específica no estado fresco de 2000 kg/m^3 foi menor quando comparado aos resultados obtidos nos concretos moldados sem o controle de massa do concreto.

Na Figura 45 são ilustrados os procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova cilíndricos na Etapa Final.

Figura 45- Procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova cilíndricos na Etapa Final.



Fonte: Autora (2017).

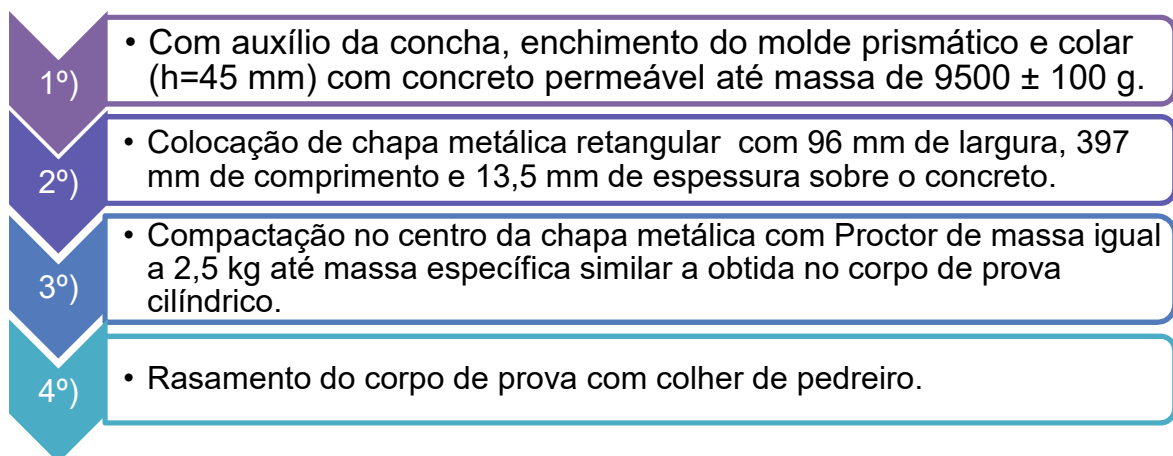
Analisando a Figura 45, verifica-se que se trabalhou com 5 procedimentos de compactação, com aplicação de 10, 20, 30, 40 e 50 golpes. A quantidade de golpes foi definida com base nos resultados das massas específicas obtidas durante a definição dos procedimentos de moldagem e compactação (Item

3.3.2.2.1), que para as quatro granulometrias de agregado graúdo estavam entre o intervalo de 1600 a 2000 kg/m³, valores recomendados na literatura.

Na compactação dos corpos de prova prismáticos, observou-se que a compactação com golpes centrados, compactou mais uniformemente o concreto quando comparado aos concretos que receberam os golpes distribuídos na chapa metálica, além disso, o procedimento é similar ao adotado na compactação dos corpos de prova cilíndrico.

Na Figura 46 são ilustrados os procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova prismáticos na Etapa Final.

Figura 46- Procedimentos de moldagem e compactação adotados para a produção dos concretos em corpos de prova prismáticos na Etapa Final.



Fonte: Autora (2017).

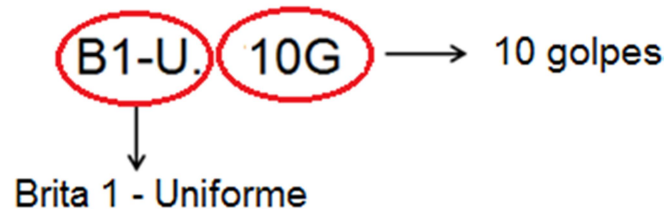
Analisando a Figura 46, verifica-se que, diferente da compactação dos corpos de prova cilíndricos, não foram definidos o números de golpes a serem aplicados com o Proctor de 2,5 kg na chapa metálica, pois, optou-se por aplicar a quantidade de golpes necessário para que a massa específica do corpo de prova prismático apresentasse valor similar ao obtido em cada procedimento de compactação do corpo de prova cilíndrico.

3.3.2.3 Produção e cura dos concretos permeáveis

Foram produzidos 20 misturas de concreto permeável, resultado da combinação de cinco procedimentos de compactação e quatro granulometrias de agregado graúdo.

A produção dos concretos permeáveis manteve o procedimento utilizado na Etapa Exploratória (Item 3.2.2.1) e para sua identificação utilizou-se a nomenclatura apresentada na Figura 47.

Figura 47- Nomenclatura para os concretos permeáveis da Etapa Final.



Fonte: Autora (2017).

Cabe ressaltar que o número de golpes da sigla, refere-se à quantidade de golpes aplicados nos corpos de prova cilíndricos, visto que não houve padronização do número de golpes nos corpos de prova prismáticos.

No Quadro 9 são apresentadas as siglas e a descrição utilizadas para identificar as 20 misturas de concretos permeáveis produzidas nesta etapa.

Quadro 9- Identificação dos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final.

SIGLA	Descrição		
	Agregado graúdo		Nº de golpes com Proctor de 2,5 kg
	Tamanho	Granulometria	
B1-U.10G	B1	Uniforme	10
B1-U.20G	B1	Uniforme	20
B1-U.30G	B1	Uniforme	30
B1-U.40G	B1	Uniforme	40
B1-U.50G	B1	Uniforme	50
B1-D.10G	B1	Descontínua	10
B1-D.20G	B1	Descontínua	20
B1-D.30G	B1	Descontínua	30
B1-D.40G	B1	Descontínua	40
B1-D.50G	B1	Descontínua	50

Continua

Quadro 9- Identificação dos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final

SIGLA	Descrição		
	Agregado graúdo		Nº de golpes com Proctor de 2,5 kg
	Tamanho	Granulometria	
B0-U.10G	B0	Uniforme	10
B0-U.20G	B0	Uniforme	20
B0-U.30G	B0	Uniforme	30
B0-U.40G	B0	Uniforme	40
B0-U.50G	B0	Uniforme	50
B0-D.10G	B0	Descontínua	10
B0-D.20G	B0	Descontínua	20
B0-D.30G	B0	Descontínua	30
B0-D.40G	B0	Descontínua	40
B0-D.50G	B0	Descontínua	50

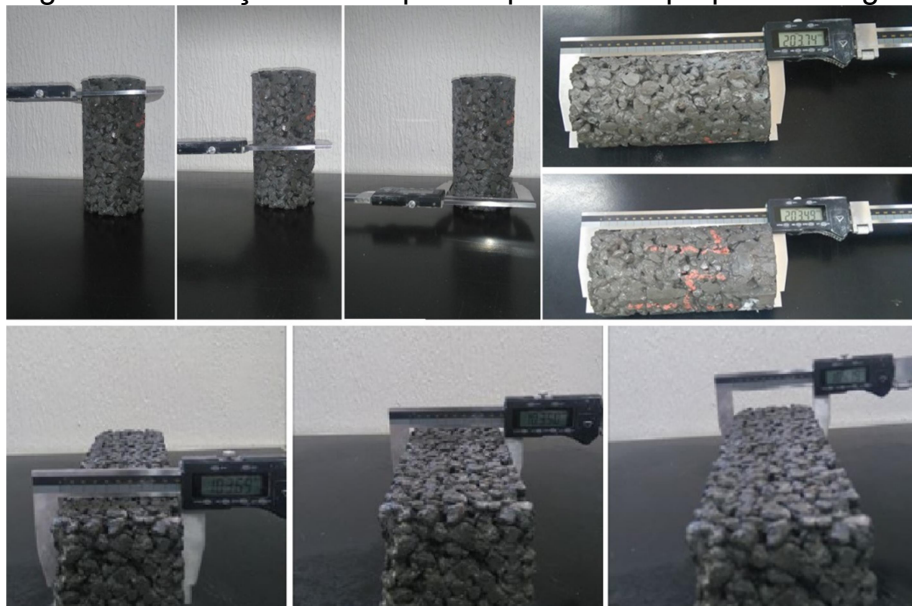
Fonte: Autora (2017).

A cura dos corpos de prova foi realizada por imersão em tanque com água e cal até a idade dos ensaios, em temperatura ambiente.

3.3.2.4 Planejamento experimental e descrição dos ensaios

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova tiveram suas medidas verificadas, conforme ilustrado na Figura 48.

Figura 48- Medição dos corpos de prova com paquímetro digital



Fonte: Autora (2017).

Os corpos de prova cilíndricos tiveram sua face superior retificada e posteriormente foram verificadas três medições de diâmetro e duas de altura. Nos corpos de prova prismáticos foram realizadas a medição de três larguras, três alturas e o comprimento.

As medições foram realizadas para determinação dos valores médios dessas dimensões, no entanto, cabe ressaltar, que em função das irregularidades existentes nos corpos de prova devido ao elevado índice de vazios e a perda de agregados durante o manuseio, podem ter ocorrido pequenas variações nesses valores.

O planejamento experimental para uma mistura é apresentado no Quadro 10. No total foram produzidos 280 corpos de prova cilíndricos e 80 prismáticos.

Quadro 10- Planejamento experimental para a Etapa Final.

Ensaio	Método	Corpos de prova		
		Quantidade	Dimensões (mm)	Formato
Massa específica no estado fresco	ABNT NBR 9833:2009	14 ^{1,2}	100 x 200	Cilíndrico
		4 ³	100 x 100 x 400	Prismático
Porcentagem de vazios	Pesagem submersa	7 ¹	100 x 200	Cilíndrico
		4 ³	100 x 100 x 400	Prismático
Permeabilidade a carga constante	Sandoval (2014)	7 ²	100 x 200	Cilíndrico
Resistência à compressão aos 28 dias	ABNT NBR 5739: 2007	14 ^{1,2}	100 x 200	Cilíndrico
Resistência à tração por flexão aos 28 dias	ABNT NBR 12142: 2010	4 ³	100 x 100 x 400	Prismático

^{1,2,3} Os números iguais indicam os mesmos corpos de prova.

Fonte: Autora (2017).

3.3.2.4.1 Porcentagem de vazios

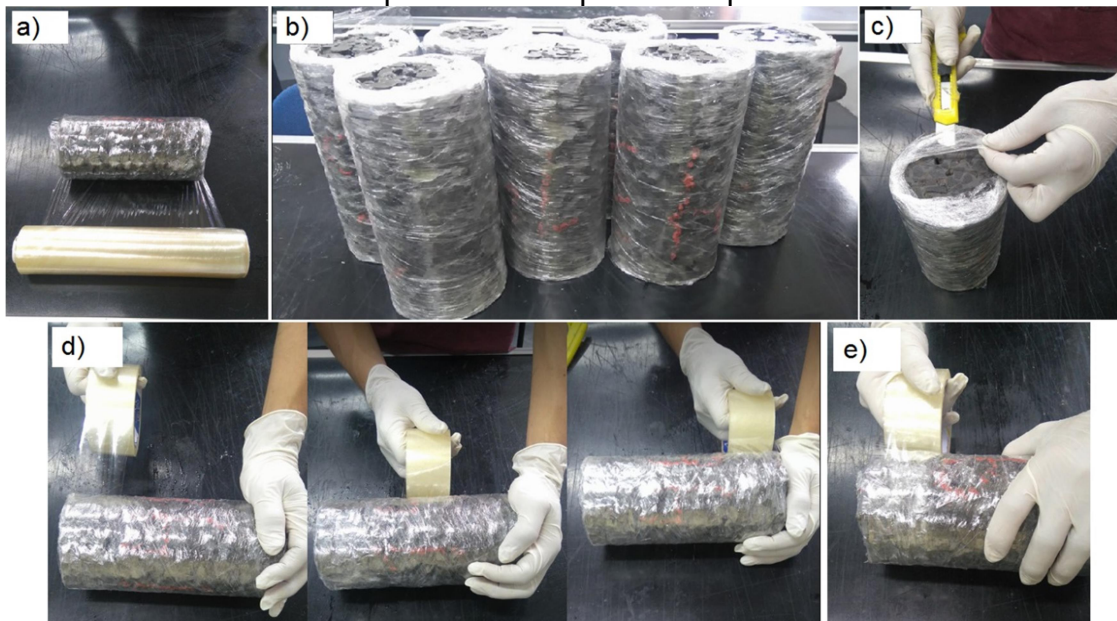
A porcentagem de vazios ou porosidade aberta, foi obtida mediante a pesagem aos 27 dias dos 14 corpos de prova cilíndricos e 4 corpos de prova prismático por mistura na condição SSS e posteriormente a pesagem submersa em água. Por meio da Equação 2 (Item 2.3.2.1), obteve-se os resultados para a porcentagem de vazios.

Dos 14 corpos de prova cilíndricos, 7 tiveram sua massa seca em estufa avaliadas (24 horas a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$). Nestes corpos de prova pelas Equações 1 e 3 (Item 2.3.2.1), obteve-se a porosidades total e fechada.

3.3.2.4.2 Permeabilidade a carga constante

Para a realização do ensaio de permeabilidade fez-se uso de um permeâmetro a carga constante. O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade das amostras nos 7 corpos de prova que não foram para a estufa, conforme procedimento ilustrado na Figura 49. O corpo de prova foi enrolado três vezes com o plástico filme transparente (Fig. 49 a e b) e teve o excesso das bordas cortados (Fig. 49 c). Posteriormente aplicaram-se duas camadas de fita adesiva transparente em volta do corpo de prova (Fig. 49 d) e na parte superior do mesmo, foram passadas mais três voltas de fita de modo a melhorar a ligação entre a amostra e o permeâmetro (Fig. 49 e).

Figura 49- Preparação do corpo de prova para o ensaio de permeabilidade: a) passagem do plástico filme; b) corpos de prova encapados; c) corte do excesso do plástico; d) passagem da fita adesiva transparente; e) passagem da fita adesiva transparente na superfície superior.



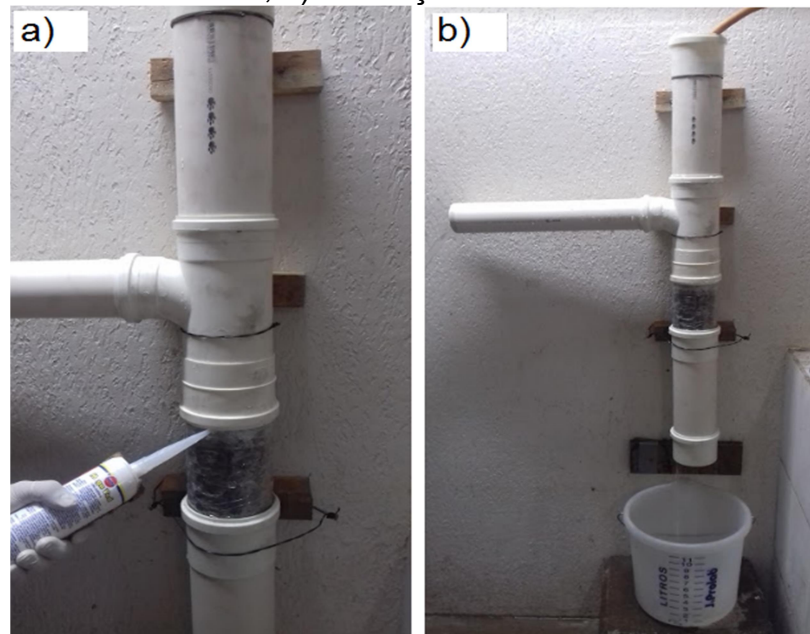
Fonte: Autora (2017)

Padronizou-se a colocação da amostra no permeâmetro com a superfície inferior para cima, pois devido ao processo de compactação a face superior se encontrava mais fechada. Estando mais fechada, a pressão que a água

exercia para passar pelo corpo de prova fazia com que as vedações utilizadas entre o permeâmetro e a amostra estourassem.

Diferente do procedimento sugerido por Sandoval (2014), que após a fixação do corpo de prova no permeâmetro o envolveu com fita com filme de Polietileno reforçado com tecido laminado de algodão, optou-se devido ao menor custo, aplicar na ligação entre a luva de esgoto e o corpo de prova adesivo silicone para vedação (Fig. 50 a). Na Figura 50 é mostrado a aplicação do silicone e o ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade sendo realizado.

Figura 50- Permeâmetro a carga constante utilizado na Etapa Final: a) aplicação do silicone; b) realização do ensaio.



Fonte: Autora (2017).

Conforme apresentado na Figura 50 b, com a amostra posicionada no permeâmetro, coletou-se a água da saída em um balde transparente cronometrando o tempo de coleta em 30 segundos e 1 minuto. Por fim o volume de água coletado foi pesado e pela Equação 5 (Item 2.3.2.2) calculou-se o coeficiente de permeabilidade das amostras

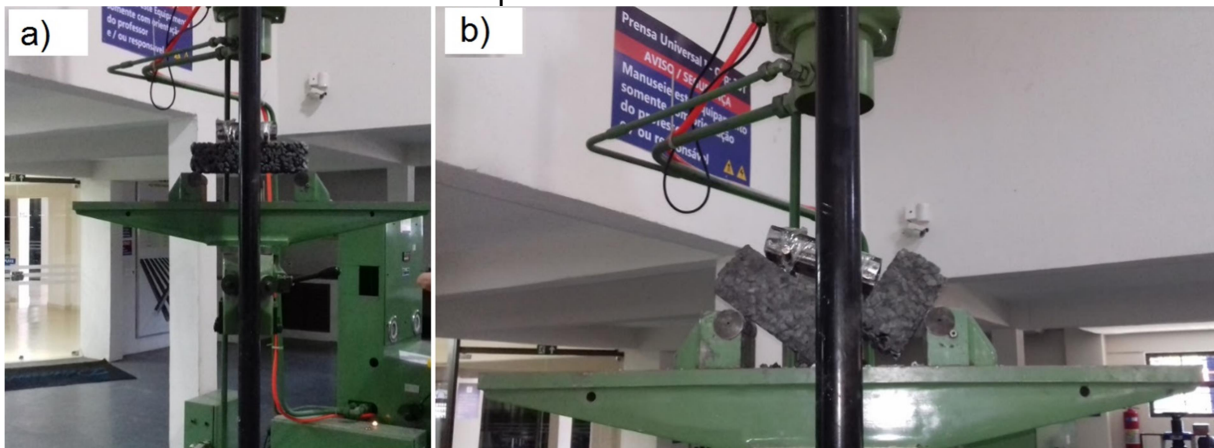
Finalizado o ensaio, os corpos de prova foram rompidos no ensaio de resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), em prensa hidráulica à compressão da marca EMIC com capacidade de 100 toneladas.

3.3.2.4.3 Resistência à tração na Flexão por quatro pontos

O ensaio de resistência à tração na flexão por quatro pontos foi executado conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010) aos 28 dias. Os corpos de prova foram ensaiados imediatamente o término do ensaio para cálculo de vazios, período inferior a 3 horas.

Colocou-se o corpo de prova com seu lado maior, paralelo ao seu eixo longitudinal, sobre os apoios, centrando-o entre eles, e as faces laterais (com relação à posição de moldagem) ficaram em contato com os elementos de aplicação de força e os apoios. Na Figura 51 é apresentado o ensaio de resistência à tração na flexão sendo realizado e a ruptura do corpo de prova no terço médio da amostra.

Figura 51- Ensaio de resistência à tração na flexão: a) amostra sendo ensaiada; b) ruptura da amostra.



Fonte: Autora (2017).

Após a aplicação da carga, a resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 8.

$$f_{ct,f} = \frac{F.l}{b.d^2} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$f_{ct,f}$: Resistência à tração na flexão (MPa);

F: Força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

l: Dimensão do vão entre os apoios (mm);

b: Largura média do corpo de prova (mm);

d: Altura média do corpo de prova (mm).

3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Na Etapa Exploratória a análise estatística foi dividida de acordo com o método de compactação: Proctor e mesa de consistência. Aplicou-se a análise de variância, em inglês *Analysis of variance* – ANOVA e o Teste de Tukey. Para a aplicação da ANOVA, foram testados os pressupostos estatísticos de homogeneidade das variâncias pelos testes de Bartlett e Levene, e a normalidade pelo gráfico normal de probabilidades dos resíduos.

Utilizou-se o Método de Box Cox para encontrar uma transformação satisfatória e garantir os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias nas massas específicas no estado fresco obtidos pelo método de compactação Proctor.

Para analisar se existe diferença significativa entre as massas específicas no estado fresco e endurecido e entre as porcentagens de vazios obtidas pelos Métodos de Batezini e Sandoval aplicou-se o teste – t (teste de Student) para amostras dependentes.

Na Etapa Final, aplicou-se o Teste de Kruskal-Wallis para as energias de compactação, as massas específicas no estado fresco e a resistência à compressão das 20 misturas de concreto, pois o pressuposto estatístico de homogeneidade das variâncias pelos testes de Bartlett e Levene foi rejeitado, ou seja, os dados se enquadraram como não paramétricos. Para a porcentagem de vazios e coeficiente de permeabilidade, após a transformação feita pelo Método Box Cox, aplicou-se a ANOVA fatorial e o Teste de Tukey e por fim, a resistência à tração na flexão foi avaliada pela ANOVA *One Way*.

Todos os testes possuem um nível de significância igual a 0,05, ou seja, para um p-valor menor que 0,05 existe diferença significativa entre as propriedades avaliadas e foram calculados os graus de liberdade (GL), a soma dos quadrados (SQ) e os quadrados médios (QM).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises para ambas as etapas do trabalho. Primeiramente, são apresentados os resultados da Etapa Exploratória que teve como objetivo definir o método de compactação para moldagem do concreto permeável em corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm. Na sequência são expostos os resultados da Etapa Final, a qual teve o intuito de propor um procedimento de compactação para corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm e prismáticos de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm e avaliar a influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

4.1 ETAPA EXPLORATÓRIA

Na Etapa Exploratória, para a moldagem de corpos de prova cilíndricos, avaliaram-se dois métodos de compactação: Proctor e Mesa de consistência, totalizando seis procedimentos de compactação. Nessa etapa foram avaliadas: a massa específica no estado fresco e endurecido; a porcentagem de vazios por dois métodos volumétricos; o coeficiente de permeabilidade; a resistência à compressão e à tração por compressão diametral aos 21 dias.

4.1.1 Massa específica

Os resultados obtidos para a massa específica no estado fresco são apresentados na Tabela 10, juntamente com a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 10- Massa específica no estado fresco dos corpos de prova cilíndrico na Etapa Exploratória.

Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	1747,46	1876,25	1885,48	1978,55	1862,30	1927,05
	1830,41	1876,31	1895,79	1999,88	1853,96	1974,22
	1728,80	1986,44	1873,06	1993,07	1849,70	1959,39
	1775,91	1848,56	1898,78	2030,82	1892,86	1931,06
	1831,43	1885,60	1902,47	1985,24	1882,74	1972,18
	1806,98	1916,48	1862,75	1972,12	1972,95	1945,51
	1747,27	1903,37	1893,05	1984,73	1962,19	2000,32
Média (kg/m ³)	1781,18	1899,00	1887,34	1992,06	1896,67	1958,53
Desvio Padrão (kg/m ³)	39,05	40,93	13,50	17,91	50,88	26,13
Coefficiente de Variação (%)	2,19	2,16	0,72	0,90	2,68	1,33

Fonte: Autora (2017).

Observa-se que os valores de massa específica no estado fresco variaram entre 1781 e 1992 kg/m³, sendo todos os valores maiores que o valor prescrito pela ABNT NBR 16416:2015 que é de 1600 kg/m³ e conforme os valores citados na literatura como geralmente utilizados nos pavimentos de concretos permeáveis, que é 2000 kg/m³.

Com o aumento do número de golpes e a moldagem dos corpos de prova em duas camadas, verifica-se que há um acréscimo no valor da massa específica no estado fresco, sendo o maior valor obtido para essa propriedade o concreto preenchido em duas camadas e que recebeu 10 golpes por camada com o Proctor (P10.n-2).

Na Figura 52, pode-se visualizar as descontinuidades verificadas no corpo de prova adensado pelo procedimento P5.n-1.

Figura 52- Exemplos de descontinuidades no corpo de prova adensado pelo procedimento P5.n-1.



Fonte: Autora (2017).

Nos procedimentos de compactação onde o preenchimento do corpo de prova se deu em uma camada apenas, verificou-se várias discontinuidades, o que pode justificar os maiores valores de desvio padrão e coeficiente de variação quando comparados aos corpos de prova moldados em duas camadas.

Os resultados da massa específica no estado endurecido são apresentados na Tabela 11, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 11- Massa específica no estado endurecido dos corpos de prova cilíndrico na Etapa Exploratória.

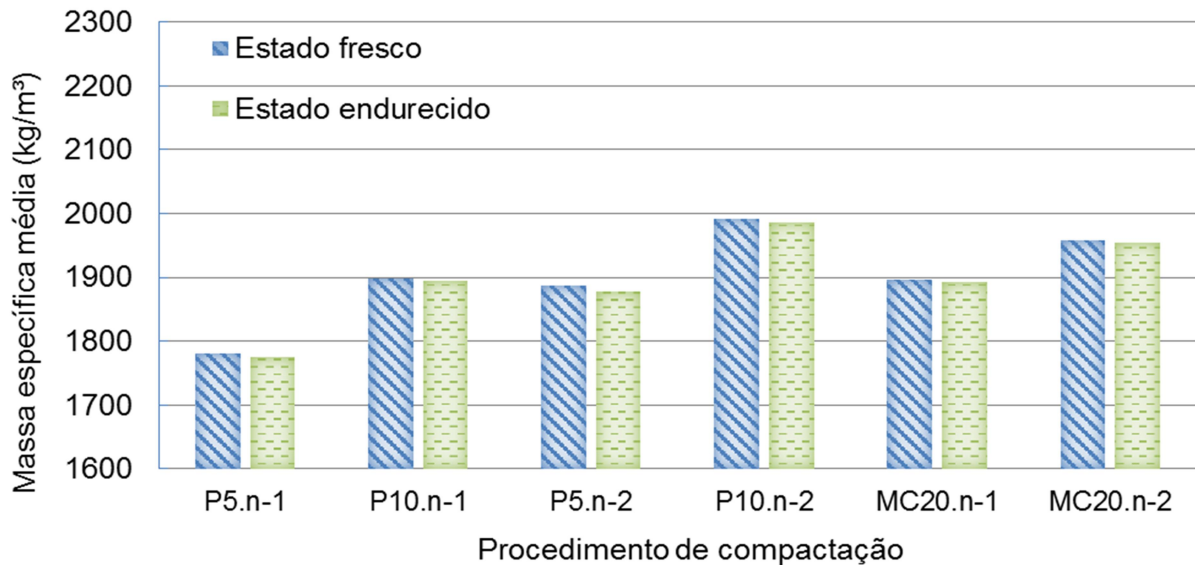
Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	1742,36	1870,71	1881,85	1972,50	1857,21	1920,87
	1817,87	1872,30	1890,12	1994,53	1851,10	1974,86
	1722,88	1980,01	1858,87	1988,74	1845,88	1958,82
	1772,41	1844,80	1883,12	2021,20	1887,51	1924,63
	1826,65	1880,07	1896,11	1978,42	1879,87	1965,82
	1798,51	1911,90	1849,13	1963,78	1967,92	1938,63
	1743,89	1898,85	1886,24	1979,70	1959,20	1995,80
Média (kg/m ³)	1774,94	1894,09	1877,92	1985,55	1892,67	1954,20
Desvio Padrão (kg/m ³)	37,44	40,30	15,96	17,28	50,75	27,51
Coeficiente de Variação (%)	2,11	2,13	0,85	0,87	2,68	1,41

Fonte: Autora (2017).

Observa-se que as massas específicas no estado endurecido variaram entre 1775 e 1986 kg/m³, sendo todos os valores maiores que o prescrito pela ABNT NBR 16416:2015 que é de 1600 kg/m³ e conforme os valores citados na literatura como geralmente utilizados nos pavimentos que é 2000 kg/m³. Assim como no estado fresco, a maior massa específica foi obtida nos concretos moldados em duas camadas que receberam 10 golpes com Proctor por camada (P10.n-2).

Na Figura 53 é apresentado um comparativo entre as massas específicas médias no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos por meio de seis procedimentos de compactação.

Figura 53- Comparativo entre a massa específica média no estado fresco e endurecido dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que a massa específica média no estado endurecido é 1% menor que a no estado fresco para todos os procedimentos de compactação, valor que se justifica pelo processo de hidratação do cimento e pela evaporação da água após o processo de endurecimento do concreto. Gaedicke, Marines e Miankodila (2014), também verificaram que a massa específica no estado fresco do concreto permeável é superior ao valor no estado endurecido, no entanto esse teor foi de 3,6%.

Pela ANOVA e o teste de Tukey, verificou-se que apenas os procedimentos P5.n-2 e P10.n-1, apresentam massas específicas no estado fresco e endurecido estatisticamente iguais, ou seja, como o número de golpes total aplicado nos corpos de prova são iguais (10 golpes), a compactação em 1 ou 2 camadas não fez diferença na propriedade. Os resultados da análise estatística para a massa específica no estado fresco para os dois métodos de compactação são apresentados no APÊNDICE 1 e para a massa específica no estado endurecido no APÊNDICE 2.

Comparando as duas amostras dependentes, pelo teste – t (teste de Student) verificou-se para os dois métodos de compactação, que as massas específicas no estado fresco e endurecido são estatisticamente diferentes, e os resultados dessa análise são apresentados no APÊNDICE 3.

4.1.2 Porcentagem de vazios

A porcentagem de vazios verificados pelo método de Batezini (2013), o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Porcentagem de vazios dos concretos permeáveis avaliados pelo método utilizado por Batezini (2013) na Etapa Exploratória.

Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Porcentagem de vazios (%)	32,74	28,39	28,39	23,61	27,68	25,05
	36,03	25,94	27,01	23,89	26,87	22,59
	33,75	23,26	26,20	24,41	27,08	25,13
	32,61	27,56	28,43	23,54	29,58	21,63
	30,75	29,12	28,67	21,80	28,95	24,78
	33,03	27,20	28,13	23,59	28,53	25,10
	29,77	25,69	29,37	24,50	27,11	24,31
Média (%)	32,67	26,74	28,03	23,62	27,97	24,08
Desvio Padrão (%)	2,03	1,96	1,07	0,89	1,06	1,30
Coeficiente de Variação (%)	6,21	7,35	3,83	3,78	3,78	5,83

Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que a porcentagem de vazios está na faixa de valores entre 24% a 33%, sendo o maior valor obtido no concreto compactado pelo procedimento preenchido em uma camada e que recebeu 5 golpes (P5.n-1), ou seja, o menos compactado.

De acordo com Obla (2010), valores superiores a 15% de vazios já garantem uma rápida percolação da água, e indicam que 20% de vazios produzem concreto com uma boa relação entre as propriedades mecânicas e hidráulicas. Desse modo, verifica-se que para os procedimentos de compactação adotados, todos os valores foram superiores aos indicados pelo autor, detonando que as misturas produzidas se enquadram no contexto de concretos permeáveis.

A porcentagem de vazios verificados pelo método de Sandoval (2014), o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13- Porcentagem de vazios dos concretos permeáveis avaliados pelo método utilizado por Sandoval (2014) na Etapa Exploratória.

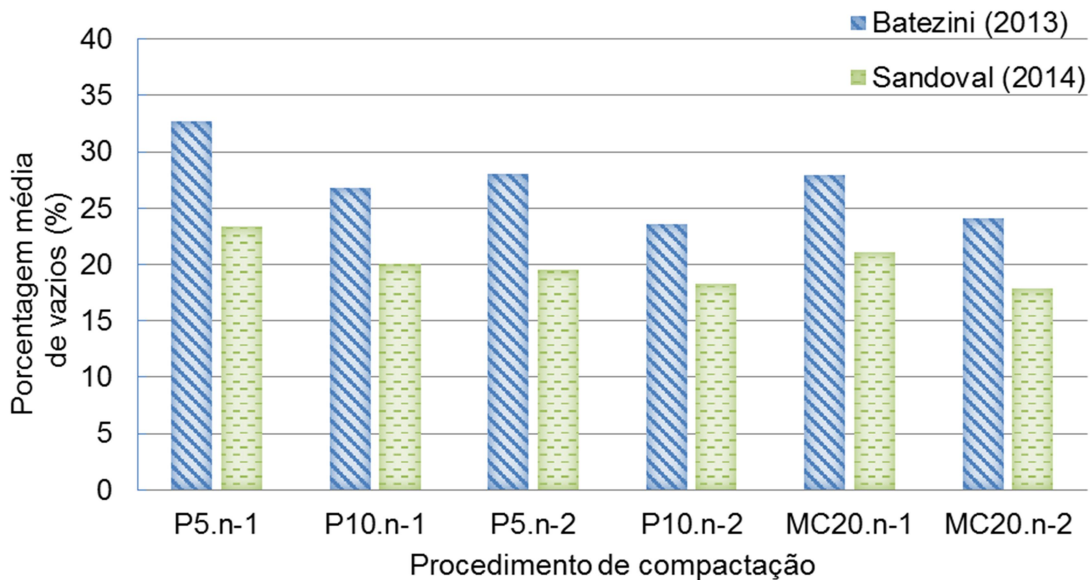
Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Porcentagem de vazios (%)	24,20	21,47	21,07	19,15	20,73	18,00
	25,29	19,40	19,84	19,07	20,61	17,35
	23,92	16,44	17,96	18,66	20,23	17,81
	22,16	21,09	19,69	18,07	21,23	17,20
	21,77	21,70	18,49	16,63	21,20	17,79
	22,73	20,64	19,88	17,18	21,42	18,91
	23,57	19,71	19,82	19,21	21,85	18,09
Média (%)	23,38	20,06	19,54	18,28	21,04	17,88
Desvio Padrão (%)	1,24	1,81	1,02	1,03	0,55	0,56
Coefficiente de Variação (%)	5,29	9,04	5,21	5,63	2,61	3,12

Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que a porcentagem de vazios dos concretos permeáveis adensados pelo método de Sandoval (2014) apresentaram valores entre 18 e 23%, estando de acordo com os valores utilizados na literatura sobre concreto permeável estudadas neste trabalho.

Na Figura 54 é apresentado um comparativo entre a porcentagem de vazios medidos pelos métodos volumétricos: Batezini (2013) e Sandoval (2014).

Figura 54- Comparativo entre a porcentagem de vazios pelos métodos de Batezini e Sandoval dos concretos permeáveis da Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

O método de Batezini (2013) apresentou valores de vazios superiores aos verificados pelo de Sandoval (2014), o que pode ser justificado pela dificuldade em garantir o preenchimento total dos vazios neste último procedimento

e manter o mesmo nível de água na superfície superior do corpo de prova.

Por esses motivos, acredita-se que o método utilizado por Batezini (2013), diminui a interferência humana, sendo o mais indicado na avaliação dos vazios de corpos de prova de concreto permeável, e por isso, utilizado na Etapa Final deste trabalho.

Verificou-se que os procedimentos de compactação P5.n-2 e P10.n-1 possuem a porcentagem de vazios estatisticamente iguais, assim como ocorreu com a massa específica. Os resultados da análise estatística para as porcentagens de vazios obtidos pelos métodos de Batezini (2013) e Sandoval (2014) são apresentados respectivamente nos APÊNDICE 4 e 5.

Comparando as porcentagens de vazios avaliados pelos dois métodos, verificou-se pelo teste – t (teste de Student) para amostras dependentes que os resultados são estatisticamente diferentes, ou seja, o método de avaliação dessa propriedade influencia no resultado obtido. Os resultados dessa análise são apresentados no APÊNDICE 6.

4.1.3 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade, o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 14.

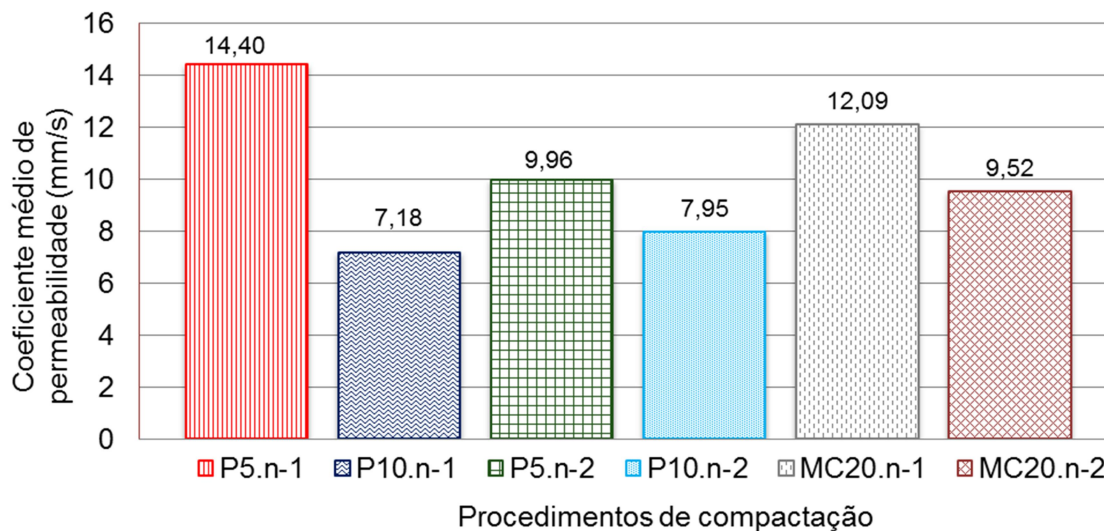
Tabela 14- Coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis.

Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Coeficiente de permeabilidade (mm/s)	16,10	8,06	10,55	10,07	10,08	11,96
	17,13	6,79	10,79	7,78	10,72	8,07
	13,91	4,55	7,14	6,00	11,01	11,82
	15,01	8,62	9,70	7,28	13,00	6,42
	9,34	7,22	9,05	7,53	14,34	10,71
	14,49	6,65	11,04	8,59	11,92	8,59
	14,81	8,37	11,47	8,38	13,55	9,08
Média (mm/s)	14,40	7,18	9,96	7,95	12,09	9,52
Desvio Padrão (mm/s)	2,48	1,39	1,49	1,26	1,59	2,06
Coeficiente de Variação (%)	17,20	19,37	14,98	15,85	13,15	21,64

Fonte: Autora (2017).

A Figura 55 apresenta a influência do procedimento de compactação do coeficiente de permeabilidade nos corpos de prova cilíndricos de concreto.

Figura 55- Influência do procedimento de compactação no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável na Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que o coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis apresentaram valores entre 7 e 14 mm/s sendo superiores os prescritos pela ACI 522R-06 para pavimentos permeáveis que é de no mínimo 1,4 mm/s e aos prescritos pela ABNT NBR 16416: 2015 que é 1 mm/s.

Verificou que os coeficientes de permeabilidade dos procedimentos: P5.n-2 e P10.n-2; P10.n-1 e P10.n-2, são considerados estatisticamente iguais. Os resultados dessa análise são apresentados no APÊNDICE 7.

4.1.4 Resistência à compressão aos 21 dias

A resistência à compressão aos 21 dias, o valor médio, desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 15.

Destaca-se que dos sete corpos de prova produzidos na Etapa Exploratória, somente quatro corpos de prova tiveram sua resistência à compressão avaliada, sendo estes, escolhidos aleatoriamente.

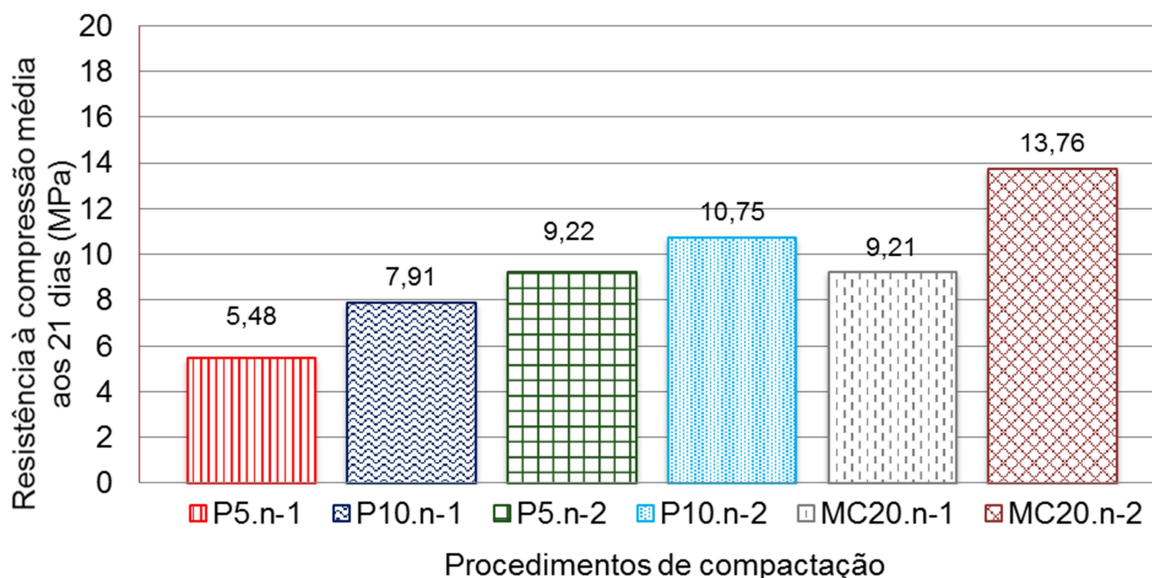
Tabela 15- Resistência à compressão aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.

Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Resistência à compressão aos 21 dias (MPa)	6,19	-	8,68	10,19	8,40	15,28
	5,22	8,25	9,68	9,27	-	-
	-	-	-	-	-	11,87
	-	8,71	-	-	9,40	14,74
	-	6,60	8,84	12,89	9,57	-
	4,81	8,07	9,68	-	9,47	13,17
Média (MPa)	5,48	7,91	9,22	10,75	9,21	13,76
Desvio Padrão (%)	0,52	0,91	0,46	1,33	0,47	1,34
Coefficiente de Variação (%)	10,86	11,57	5,78	14,28	5,90	11,27

Fonte: Autora (2017).

A Figura 56 apresenta a influência do procedimento de compactação na resistência à compressão média aos 21 dias dos concretos permeáveis.

Figura 56- Influência do procedimento de compactação na resistência à compressão média aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Figura 56, que a resistência à compressão aos 21 dias dos concretos estudados apresentou valores na faixa de 5 MPa a 14 MPa, sendo considerados estatisticamente iguais entre os procedimentos P5.n-2 e P10.n-1; P5.n-2 e P10.n-2; MC20.n-1 e MC20.n-2. Os resultados dessa análise são apresentados no APÊNDICE 8.

4.1.5 Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias

A resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias dos três corpos de prova em concreto, por procedimento de compactação, o valor médio, desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 16.

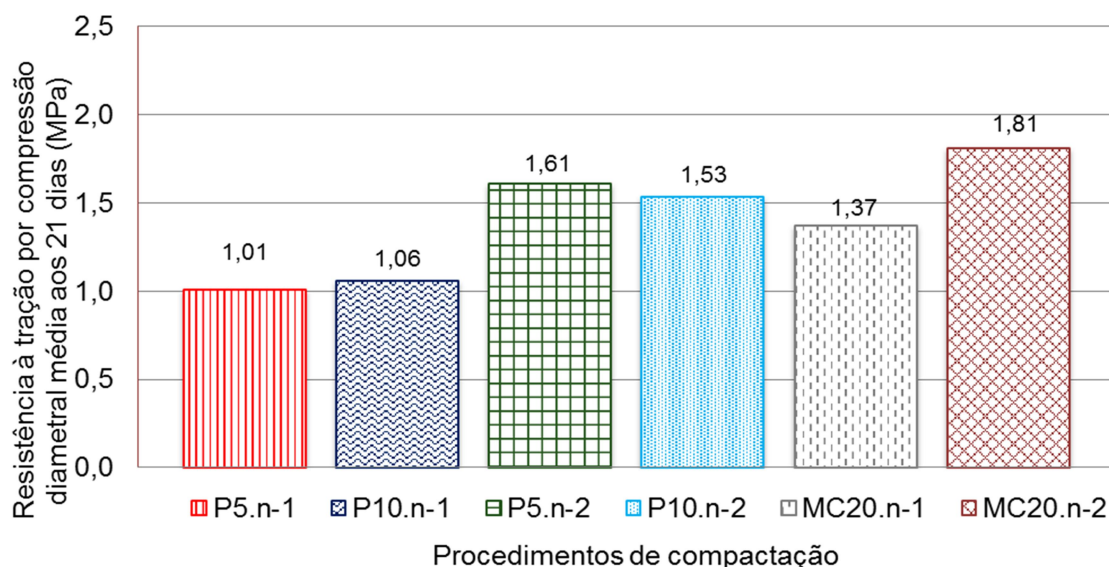
Tabela 16- Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.

Procedimento de compactação	P5.n-1	P10.n-1	P5.n-2	P10.n-2	MC20.n-1	MC20.n-2
Resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias (MPa)	-	0,79	-	-	-	-
	-	-	-	-	1,60	1,80
	0,64	1,76	1,91	1,54	1,53	-
	0,92	-	1,50	1,82	-	-
	1,45	-	-	-	-	1,84
	-	0,63	1,41	1,24	-	-
	-	-	-	-	0,97	1,78
Média (MPa)	1,01	1,06	1,61	1,53	1,37	1,81
Desvio Padrão (%)	0,41	0,61	0,27	0,29	0,34	0,03
Coeficiente de Variação (%)	40,82	57,59	16,56	18,88	25,08	1,61

Fonte: Autora (2017).

A Figura 57 apresenta a influência do procedimento de compactação na resistência à tração por compressão diametral média aos 21 dias dos concretos permeáveis.

Figura 57- Influência do procedimento de compactação na resistência à tração por compressão diametral média aos 21 dias dos concretos permeáveis na Etapa Exploratória.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que a resistência à tração por compressão diametral aos 21 dias dos concretos estudados apresentou valores na faixa de 1 MPa a 2 MPa. Similar ao concreto convencional que apresentam como valores típicos resistência à tração por compressão diametral de 10 a 15% da resistência à compressão, para esta etapa a média foi de 15%.

Além disso, estatisticamente verificou-se que os procedimentos de compactação não influenciaram significativamente nesta propriedade. Os resultados dessa análise são apresentados no APÊNDICE 9.

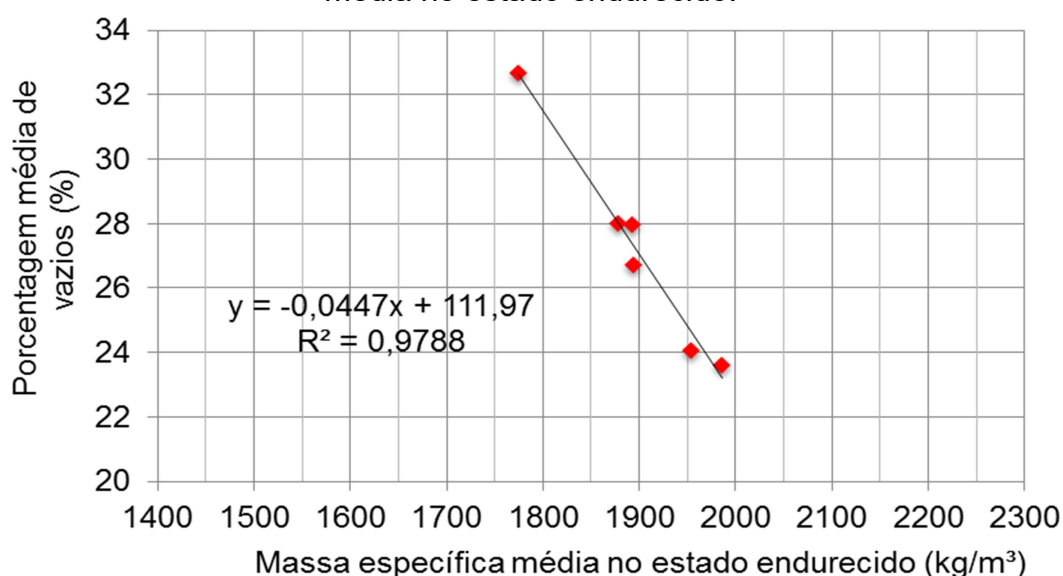
4.1.6 Correlações entre as propriedades

Para melhor interpretar os resultados da Etapa Exploratória foi realizada a análise de correlações entre as propriedades no estado fresco, mecânicas e hidráulicas que foram avaliadas nos mesmos corpos de prova.

4.1.6.1 Massa específica no estado endurecido x porcentagem de vazios

Na Figura 58 é apresentada a correlação entre a porcentagem média de vazios obtidos pelo método de Batezini (2013) e a massa específica média no estado endurecido.

Figura 58- Correlação entre a porcentagem média de vazios e a massa específica média no estado endurecido.



Fonte: Autora (2017).

Observa-se que o índice de vazios tende a diminuir com a elevação da massa específica no estado endurecido, apresentando uma correlação linear entre as propriedades estudadas, resultado que corrobora com os valores verificados por Batezini (2013).

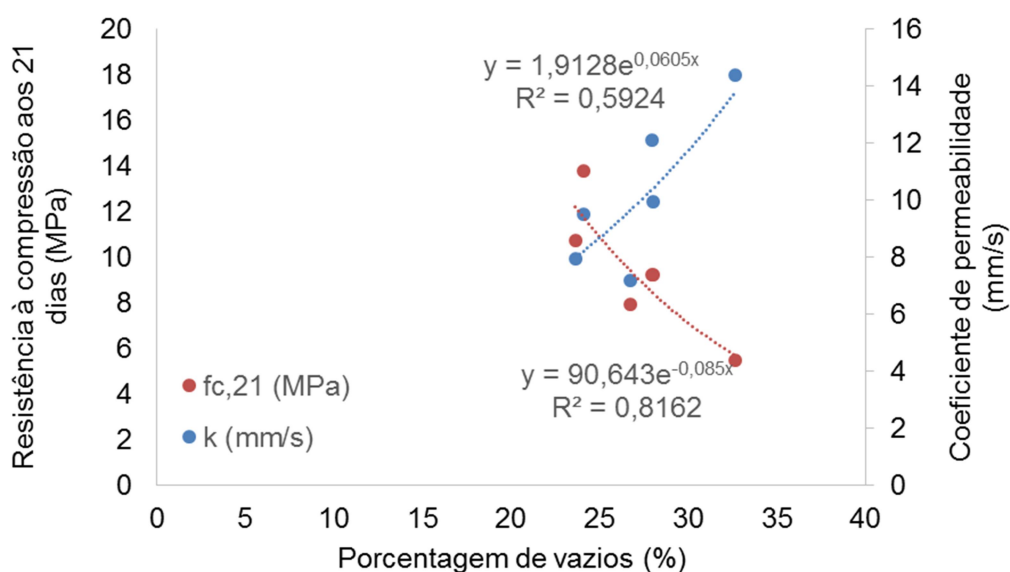
Putman e Neptune (2011) também obtiveram em testemunhos extraídos de pavimentos uma correlação linear entre a massa específica e a porcentagem de vazios, sendo obtidos respectivamente os valores de 1400 a 2000 kg/m³ e 10 a 40% para essas propriedades.

Ghafoori e Dutta (1995) no concreto com traço 1:4, e quatro procedimentos de compactação, obtiveram massas específicas entre 1642,85 a 1800,33 kg/m³ e porcentagem de vazios entre 18,62 a 27,22%, valores similares aos encontrados nesta etapa.

4.1.6.2 Resistência à compressão x Porcentagens de vazios x coeficiente de permeabilidade

Na Figura 59 é apresentada a correlação entre a resistência à compressão média, a porcentagem média de vazios verificada pelo método de Batezini (2013) e o coeficiente de permeabilidade.

Figura 59- Correlação entre a resistência à compressão, porcentagens de vazios e coeficiente de permeabilidade.



Fonte: Autora (2017).

À medida que ocorreu a elevação da porcentagem de vazios das amostras de concreto permeável, o coeficiente de permeabilidade também aumentou, apresentando uma correlação exponencial entre as propriedades, resultado que confirma os valores obtidos Crouch *et al.* (2006).

Verifica-se que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da porcentagem de vazios, apresentando uma correlação exponencial entre as duas propriedades.

As correlações são similares as verificadas por Schaefer *et al.* (2006) que para resistência à compressão entre .3 e 24 MPa, os concretos apresentaram entre 10 a 35% de vazios e 4 a 18 mm/s de coeficiente de permeabilidade.

4.1.7 Resumo da Etapa Exploratória

Na Tabela 17 é apresentado o resumo das propriedades dos concretos permeáveis obtidos na Etapa Exploratória, juntamente com as considerações que direcionaram para a elaboração da Etapa Final.

Tabela 17- Resumo da Etapa Exploratória.

Procedimento de compactação	ρ média (kg/m ³)		Vv (%)		k (mm/s)	fc (MPa)	F _{L,D} (MPa)
	Fresco	Endurecido	Batezini (2013)	Sandoval (2014)			
P5.n-1	1781,18	1774,94	32,67	23,38	14,40	5,48	1,01
P5.n-2	1887,34	1877,92	28,03	19,54	9,96	9,22	1,61
P10.n-1	1899,00	1894,09	26,74	20,06	7,18	7,91	1,06
P10.n-2	1992,06	1985,55	23,62	18,28	7,95	10,75	1,53
MC20.n-1	1896,67	1892,67	27,97	21,04	12,09	9,21	1,37
MC20.n-2	1958,53	1954,20	24,08	17,88	9,52	13,76	1,81

Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Tabela 17 que os procedimentos de compactação propostos nessa etapa, influenciaram nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. O aumento do número de golpes durante a compactação dos corpos de prova sejam eles preenchidos em uma ou duas camadas, proporcionaram maiores valores nas massas específicas no estado fresco e endurecido, na

resistência à compressão e à tração por compressão diametral e menores porcentagens de vazios e coeficientes de permeabilidade.

Acredita-se que a escolha pelos procedimentos moldados em uma camada, sejam os mais indicados para moldar os corpos de prova em laboratório tendo em vista que os pavimentos permeáveis de concreto moldado in loco são executados também em uma camada. Além disso, a moldagem em uma camada elimina um possível ponto de falha que é a interface entre as camadas.

Com relação ao método de compactação, o uso da mesa de consistência tende a fazer com que a pasta do concreto permeável vá para o fundo do corpo de prova, prejudicando a avaliação do coeficiente de permeabilidade, e por esse motivo, adotou-se na Etapa Final o Proctor de 2,5 kg como método de compactação.

Com relação aos ensaios para a avaliação da porcentagem de vazios ou porosidade aberta, verificou-se que existe diferença significativa nos resultados obtidos pelos dois métodos volumétricos utilizados por Batezini (2013) e Sandoval (2014), sendo o método de Batezini, considerado neste trabalho o mais preciso por diminuir a interferência humana durante a realização do ensaio, e adotado na Etapa Final.

4.2 ETAPA FINAL

Primeiramente são apresentados os resultados das massas específicas obtidas durante o estudo para definição dos procedimentos de moldagem e compactação dos corpos de prova cilíndrico e prismáticos. Na sequência, são apresentadas as propriedades avaliadas nas vinte misturas de concreto permeável.

4.2.1 Moldagem e compactação

Os resultados da massa específica no estado fresco verificados em corpos de prova cilíndricos moldados com o lançamento do concreto em volume, ou seja, sem controle da massa, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18- Massa específica do concreto no estado fresco durante o procedimento de compactação com preenchimento do corpo de prova cilíndrico em volume.

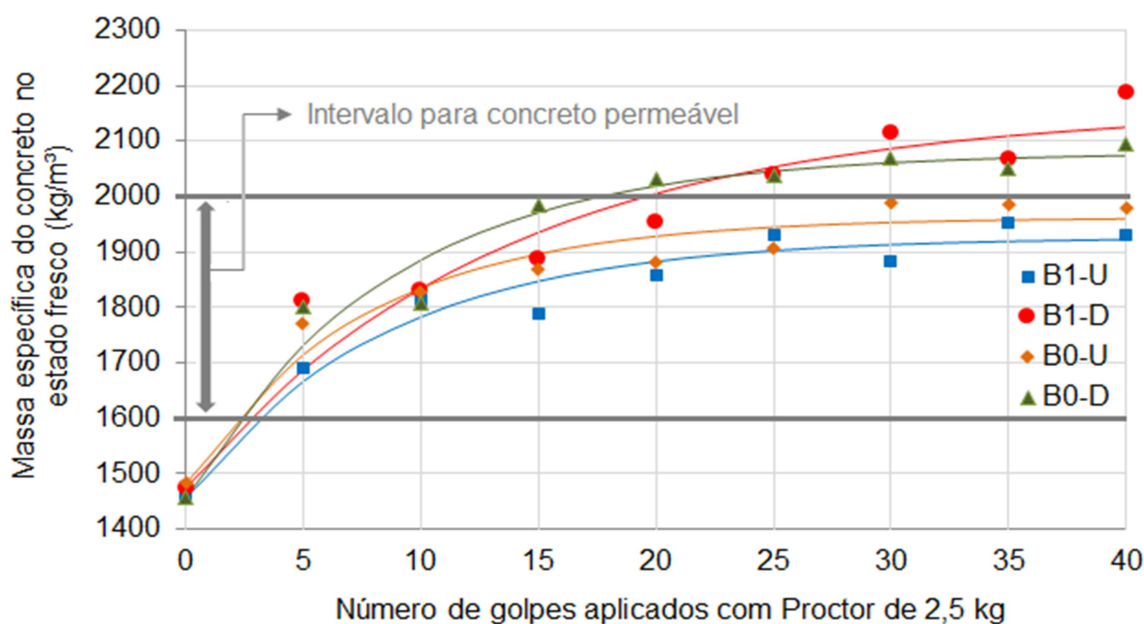
Número de golpes (N)	Massa específica do concreto permeável no estado fresco (kg/m ³)*			
	B1-U	B1-D	B0-U	B0-D
0	1456,49	1474,41	1482,69	1457,06
5	1690,01	1810,77	1772,03	1801,98
10	1815,38	1829,94	1827,29	1807,14
15	1787,98	1888,53	1868,29	1983,71
20	1859,14	1954,28	1880,92	2030,91
25	1931,27	2040,37	1907,24	2038,55
30	1883,91	2114,51	1988,23	2070,38
35	1951,97	2068,33	1987,08	2050,71
40	1930,86	2189,05	1980,59	2093,81

* Média de duas determinações

Fonte: Autora (2017).

Os resultados apresentados na Tabela 18 são ilustrados na Figura 60 por meio da correlação entre massa específica no estado fresco e o número de golpes aplicados com o cilindro de Proctor nos corpos de prova cilíndricos preenchidos com concreto em volume, juntamente com as curvas de regressão não linear calculadas pelo software SPSS.

Figura 60- Correlação entre massa específica do concreto no estado fresco e número de golpes obtidos durante o procedimento de compactação com preenchimento do molde cilíndrico em volume.



Fonte: Autora (2017).

As curvas de ajuste apresentadas na Figura 60, foram calculadas por meio da Equação 9, e representam o comportamento esperado da massa específica em função do número de golpes, com uma compactação mais rápida no início do ensaio e tendendo a um valor máximo de compactação possível (uma assíntota horizontal, Me_{sup}).

$$Me_{(n)} = Me_{inf} + (Me_{sup} - Me_{inf}) \cdot (1 - e^{-kn}) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

n - número de golpes aplicado;

$Me_{(n)}$ – Massa específica do concreto no estado fresco para n número de golpes;

Me_{inf} - Massa específica do concreto para 0 golpes (a massa obtida a pós o lançamento do concreto no cilindro);

Me_{sup} – Massa específica do concreto máxima possível com a compactação, ajustado pela regressão não linear;

k – Coeficiente que controla a forma da curva, ajustado pela regressão não linear (quando maior o seu valor, menos golpes são necessários para compactar o material até uma determinada massa específica).

No APÊNDICE 10, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 60.

Observa-se na Figura 60 que os corpos de prova não compactados apresentaram massa específica no estado fresco inferior a 1600 kg/m³, valor mínimo prescrito pela ABNT NBR 16416: 2015. Além disso, para os concretos com agregados graúdos de granulometria descontínua, devido ao menor índice de vazios e conseqüentemente maior massa unitária, foi necessária uma menor quantia de golpes para alcançar a massa específica próxima ou igual a 2000 kg/m³, valor estabelecido nesse trabalho como limite superior desejado para as misturas avaliadas.

Os resultados obtidos mediante duas repetições da massa específica no estado fresco dos corpos de prova moldados com a padronização da massa de concreto durante o lançamento no molde são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19- Massa específica do concreto no estado fresco durante o procedimento de compactação com preenchimento do corpo de prova cilíndrico em massa.

Número de golpes (N)	Massa específica do concreto permeável no estado fresco (kg/m ³)*			
	B1-U	B1-D	B0-U	B0-D
0	1599,70	1591,80	1587,28	1555,29
5	1770,34	1771,78	1762,32	1772,48
10	1773,94	1811,85	1815,64	1841,16
15	1828,53	1907,17	1888,50	1879,21
20	1844,16	1913,87	1927,88	1965,12
25	1852,85	1931,89	1960,53	1997,01
30	1856,16	1955,63	1981,73	2007,39
35	1932,84	1989,53	1995,83	2028,33
40	1959,45	2004,84	2048,64	2051,44
45	2016,56	2039,92	2067,74	2063,03
50	2042,85	2058,83	2087,92	2076,46

* Média de duas determinações

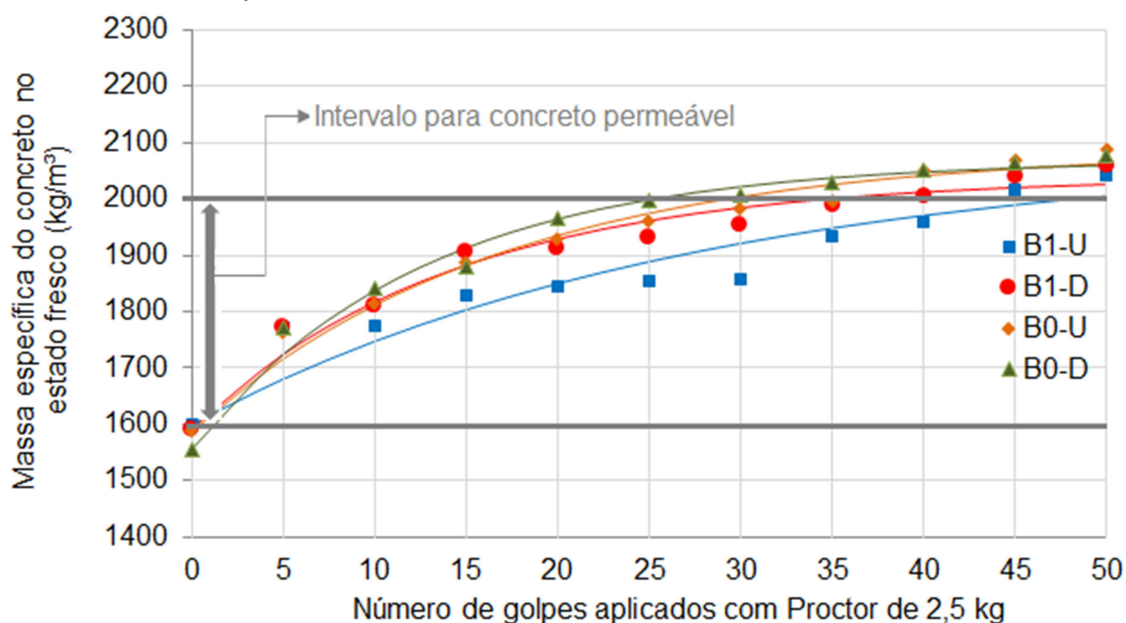
Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Tabela 19, que os concretos não compactados apresentaram valores próximos a massa específica mínima prescrita pela ABNT NBR 16416:2015, que é 1600 kg/m³. Com relação ao valor máximo apresentado na literatura, que é de 2000 kg/m³, nos concretos com agregados descontínuos, menor foi o número de golpes necessário para atingir esse valor.

Os resultados apresentados na Tabela 19 são ilustrados na Figura 61 por meio da correlação entre massa específica no estado fresco e o número de golpes aplicados com o cilindro de Proctor nos corpos de prova cilíndricos preenchidos com concreto em massa, juntamente com as curvas de regressão não linear calculadas pelo software SPSS, por meio da aplicação da Equação 9 (Item 4.2.1).

No APÊNDICE 11, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 61.

Figura 61- Correlação entre massa específica do concreto no estado fresco e número de golpes obtidos durante o procedimento de compactação com preenchimento do molde cilíndrico em massa.



Fonte: Autora (2017).

A evolução da massa específica em função do número de golpes é similar à obtida por Ghafoori e Dutta (1995) que correlacionaram a massa específica em função da energia de compactação (ver Figura 20).

Analisando a Figura 61, verifica-se que os concretos com agregado graúdo de granulometria uniforme e maior tamanho (brita 1), por apresentarem uma menor massa unitária e maior índice de vazios, resultaram em concretos com massas específicas no estado fresco menores quando comparados aos produzidos com agregados descontínuos e brita 0.

No APÊNDICE 12 é apresentado o volume de concreto e energia de compactação calculada durante o procedimento de compactação com preenchimento do molde cilíndrico em massa.

Os resultados das massas específicas dos concretos produzidos com quatro granulometrias em corpos de prova prismáticos compactados com golpes distribuídos na chapa metálica pelo cilindro de Proctor são apresentados na Tabela 20, juntamente com o número de golpes aplicados com o cilindro de Proctor.

Tabela 20- Massa específica no estado fresco do concreto permeável de corpos de prova prismáticos compactados com golpes distribuídos na chapa metálica.

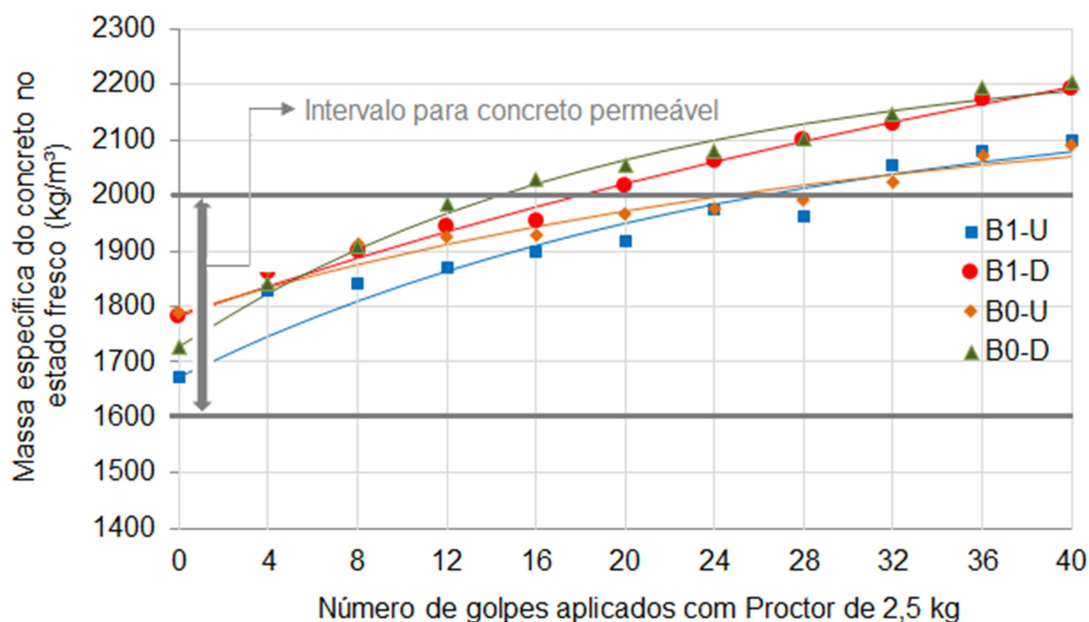
Número de golpes (N)	Massa específica do concreto permeável no estado fresco (kg/m³)*			
	B1-U	B1-D	B0-U	B0-D
0	1673,13	1782,78	1787,53	1727,75
4	1827,45	1861,25	1866,98	1842,00
8	1842,00	1898,75	1911,95	1909,28
12	1869,95	1945,73	1927,05	1983,60
16	1897,98	1952,75	1930,28	2027,78
20	1916,83	2016,45	1965,70	2054,85
24	1973,40	2063,93	1975,00	2080,70
28	1961,30	2099,08	1991,50	2101,43
32	2055,15	2128,28	2025,63	2146,45
36	2081,28	2173,65	2073,20	2193,33
40	2098,40	2194,30	2092,30	2203,13

* Média de duas determinações

Fonte: Autora (2017).

Os resultados apresentados na Tabela 20 são ilustrados na Figura 62 por meio da correlação entre massa específica no estado fresco de corpos de prova prismáticos e o número de golpes aplicados distribuídamente na chapa metálica, juntamente com as curvas de regressão não linear calculadas pelo software SPSS, por meio da aplicação da Equação 9 (Item 4.2.1).

Figura 62- Correlação entre massa específica do concreto permeável no estado fresco e número de golpes obtidos em corpos de prova prismáticos durante o procedimento de compactação com aplicação dos golpes distribuídos na chapa metálica.



Fonte: Autora (2017).

No APÊNDICE 13, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 62.

Analisando a Figura 62, verifica-se que todos os concretos apresentaram massa específica superior a 1600 kg/m³, sendo maiores nos produzidos com brita de dimensão máxima característica menor e com granulometria descontínua, conforme ocorrido na compactação dos corpos de prova cilíndrico.

No APÊNDICE 14 é apresentado o volume de concreto e a energia de compactação calculada durante o procedimento de compactação dos corpos de prova prismáticos com aplicação dos golpes distribuídos na chapa metálica.

Os resultados das massas específicas médias para concretos permeáveis produzidos com quatro granulometrias em corpos de prova prismáticos compactados com golpes concentrados na chapa metálica pelo cilindro de Proctor são apresentados na Tabela 21, juntamente com o número de golpes aplicados com o cilindro de Proctor.

Tabela 21- Massa específica no estado fresco do concreto permeável de corpos de prova prismáticos compactados com golpes concentrados na chapa metálica.

Número de golpes (N)	Massa específica do concreto permeável no estado fresco (kg/m ³)*			
	B1-U	B1-D	B0-U	B0-D
0	1844,18	1854,53	1837,38	1880,25
1	1859,93	1857,03	1845,83	1888,75
3	1872,30	1901,55	1872,98	1929,68
5	1881,65	1951,95	1911,95	1958,10
7	1891,45	1978,03	1934,00	1984,95
9	1949,60	2059,18	1961,80	2029,50
11	1963,95	2063,78	2003,63	2040,85
13	1981,13	2099,08	2030,05	2078,97
15	2005,63	2144,73	2041,75	2095,63

* Média de duas determinações

Fonte: Autora (2017).

Os resultados apresentados na Tabela 21 são ilustrados na Figura 63 por meio da correlação entre massa específica no estado fresco de corpos de prova prismáticos e o número de golpes aplicados concentrados na chapa metálica, calculados por meio da Equação 10.

$$Me(n) = Me_{inf} + \alpha * n \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

n - número de golpes aplicado;

$Me_{(n)}$ – Massa específica do concreto no estado fresco para n número de golpes;

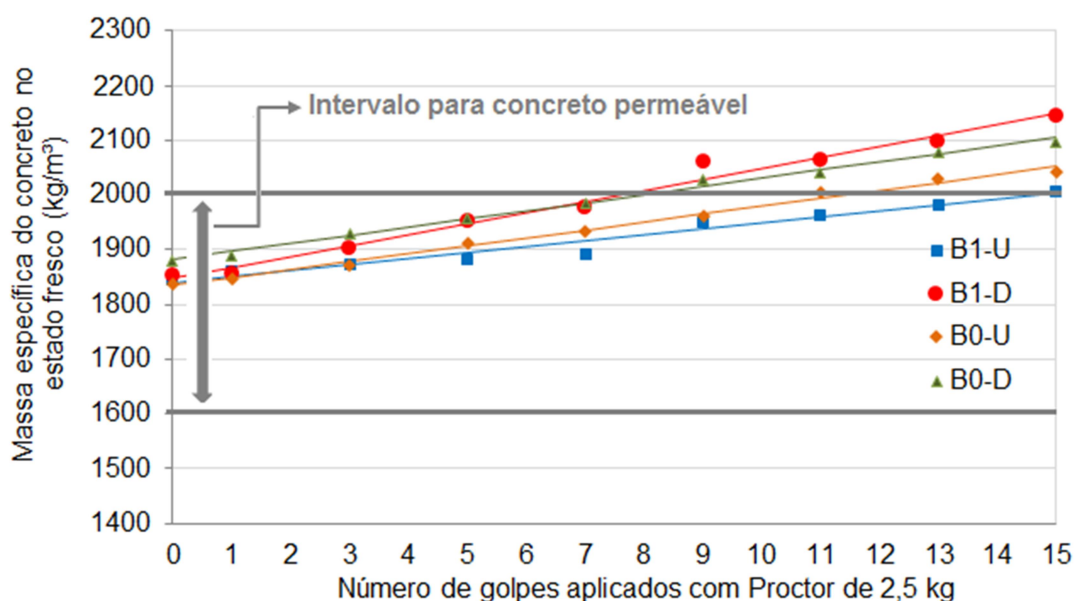
Me_{inf} - Massa específica do concreto para 0 golpes (a massa obtida a pós o lançamento do concreto no cilindro);

α - coeficiente angular da reta.

Diferentemente das curvas apresentadas nas Figuras 60, 61 e 62, o ensaio não chegou ao número de golpes necessários para indicar a compactação máxima possível, uma vez este valor está provavelmente mais distante do intervalo de interesse que é entre 1600 e 2000 kg/m³ (concreto permeável). Devido a isso, os dados medidos correspondem apenas uma parte mais linear da curva, o que impossibilita um bom ajuste por regressão da Equação 10. Por isso neste caso as regressões apresentadas são lineares, que representam bem a tendência dentro do intervalo de dados.

No APÊNDICE 15, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 63.

Figura 63- Correlação entre massa específica do concreto permeável no estado fresco e número de golpes obtidos em corpos de prova prismáticos durante o procedimento de compactação com aplicação dos golpes centrados na chapa metálica.



Fonte: Autora (2017).

Analisando a Figura 63 verifica-se que a quantidade de golpes necessária para atingir a massa específica no estado fresco de 2000 kg/m^3 , comparado ao procedimento anterior, foi menor e como esperado, os concretos com granulometrias descontínuas e tamanhos menores apresentaram maiores massas específicas do que as com granulometria uniforme.

No APÊNDICE 16 são apresentados o volume de concreto e a energia de compactação calculadas durante o procedimento de compactação dos corpos de prova prismáticos com aplicação dos golpes concentrados na chapa metálica.

4.2.2 Avaliação dos concretos permeáveis produzidos

A seguir são apresentados os valores da energia de compactação e as propriedades avaliadas nas vinte misturas de concreto permeável, produzidos por cinco procedimentos de compactação e quatro granulometrias de agregado graúdo.

4.2.2.1 Massa específica no estado fresco

As massas específicas no estado fresco dos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final em corpos de prova cilíndrico e prismáticos são apresentadas a seguir.

4.2.2.1.1 Corpos de prova cilíndricos

Os resultados médios das massas específicas no estado fresco dos concretos permeáveis produzidos em corpos de prova cilíndricos são apresentados na Tabela 22, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 22 constam no APÊNDICE 17.

Tabela 22- Massa específica média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.

Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1880,04	1956,42	1983,52	2087,09	2120,69
Desvio Padrão (kg/m ³)	10,89	11,22	19,38	10,02	20,10
Coefficiente de Variação (%)	0,58	0,57	0,98	0,48	0,95
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1857,34	1931,03	1976,01	2086,22	2112,54
Desvio Padrão (kg/m ³)	13,14	19,03	11,94	12,40	17,66
Coefficiente de Variação (%)	0,71	0,99	0,60	0,59	0,84
Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1975,67	2042,80	2116,86	2155,83	2204,80
Desvio Padrão (kg/m ³)	14,81	10,87	12,20	7,14	11,05
Coefficiente de Variação (%)	0,75	0,53	0,58	0,33	0,50
Procedimento de compactação	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1956,07	2021,58	2091,07	2123,30	2165,38
Desvio Padrão (kg/m ³)	10,41	5,92	6,11	7,62	9,48
Coefficiente de Variação (%)	0,53	0,29	0,29	0,36	0,44

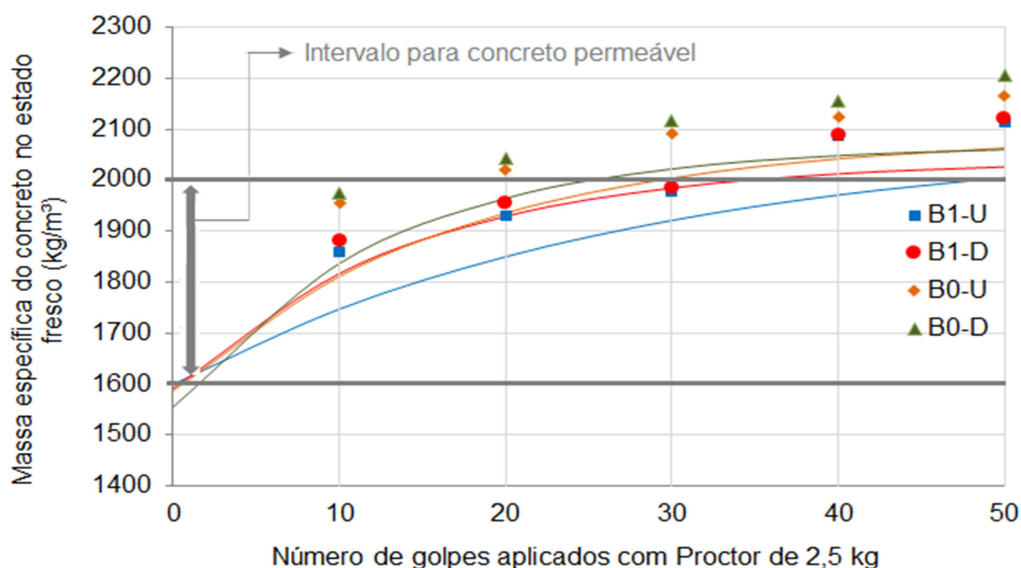
* Resultado médio de 14 determinações.

Fonte: Autora (2017).

Observam-se na Tabela 22 que foram produzidos concretos com massas específicas no estado fresco entre 1856 kg/m³ a 2205 kg/m³, valores superiores ao prescrito pela ABNT NBR 16416:2015, que é 1600 kg/m³.

Na Figura 64 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto no estado fresco, juntamente com as curvas de regressão (APÊNDICE 11) verificadas durante o estudo de definição do procedimento de moldagem e compactação.

Figura 64- Influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto permeável no estado fresco produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Figura 64, que para todas as granulometrias de agregado graúdo, quanto maior os números de golpes aplicados durante o procedimento de compactação mais elevada foram às massas específicas obtidas para os concretos permeáveis. Além disso, para o mesmo número de golpes, os concretos permeáveis com agregados produzidos com agregados de granulometria descontínua apresentaram massas específicas maiores que os produzidos com granulometria uniforme, resultado justificado pela menor massa unitária desses últimos. O mesmo ocorreu com os agregados com dimensão máxima característica menor.

Também se observa que resultados encontrados estão fora das curvas de ajustes encontradas no estudo preliminar, situação justificada pela heterogeneidade do material e pela dificuldade em realizar o rasamento do concreto durante o procedimento de moldagem.

De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, são considerados com massas específicas estatisticamente iguais os concretos com brita 1, granulometria descontínua e uniforme, aqueles que receberam até 30 golpes, e para os produzidos com brita 0, aqueles que receberam até 20 golpes, ou seja, o número de golpes exerce influência na propriedade avaliada, bem como a distribuição granulométrica e o tamanho do agregado graúdo. A distribuição χ^2 ou qui-quadrado, grau de liberdade

e p-valor, que indica entre quais concretos existe uma diferença significativa, são apresentados no APÊNDICE 18.

4.2.2.1.2 Corpos de prova prismáticos

Os resultados médios das massas específicas no estado fresco dos concretos produzidos em corpos de prova prismáticos de 100 x 100 x 400 mm são apresentados na Tabela 23, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 23- Massa específica média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.

Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	-	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1913,73	1935,18	1998,09	2079,09	2132,89
Desvio Padrão (kg/m ³)	4,54	3,72	1,87	4,48	1,11
Coeficiente de Variação (%)	0,24	0,19	0,09	0,22	0,05
Procedimento de compactação correspondente	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	-	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1886,43	1919,24	1938,07	2075,72	2103,88
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,08	4,87	2,97	5,72	7,75
Coeficiente de Variação (%)	0,06	0,25	0,15	0,28	0,37
Procedimento de compactação correspondente	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	-	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1993,11	2039,71	2113,86	2141,16	2186,69
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,69	1,25	11,22	9,11	5,83
Coeficiente de Variação (%)	0,08	0,06	0,53	0,43	0,27
Procedimento de compactação correspondente	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	-	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
Massa específica média no estado fresco (kg/m ³)*	1986,50	2022,79	2066,64	2112,26	2165,18
Desvio Padrão (kg/m ³)	0,60	4,17	5,15	9,04	4,67
Coeficiente de Variação (%)	0,03	0,21	0,25	0,43	0,22

* Resultado médio de 4 determinações.

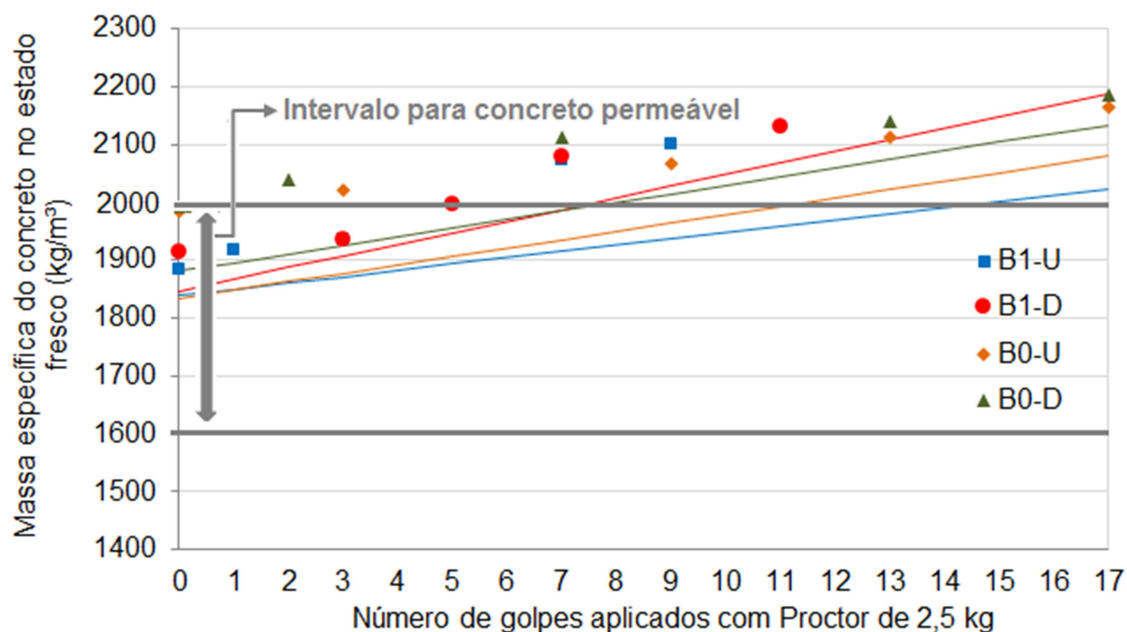
Fonte: Autora (2017).

Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 23 constam no APÊNDICE 17.

Observa-se na Tabela 23, que o número de golpes aplicados nos corpos de prova prismático variaram entre 0 a 17 golpes, quantidade inferior as aplicadas nos corpos de prova cilíndricos que variaram de 10 a 50 golpes, no entanto, apresentaram massas específicas no estado fresco entre 1914 kg/m³ a 2187 kg/m³, valores similares aos obtidos nos concretos moldados nos corpos de prova cilíndricos. Todos os valores são superiores a massa específica mínima exigida pela ABNT NBR 16416:2015, que é 1600 kg/m³.

Na Figura 65 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto permeável no estado fresco produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova prismáticos, juntamente com as curvas de regressão apresentadas na Figura 63, durante o estudo de definição do procedimento de moldagem e compactação.

Figura 65- Influência do procedimento de compactação na massa específica média do concreto permeável no estado fresco produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova prismático.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Figura 65 que o uso da brita 0 produz em vários pontos, concretos permeáveis com maiores massas específicas quando comparado aos concretos com brita 1. O uso do agregado descontínuo, assim como ocorreu nos

concretos produzidos nos corpos de prova cilíndrico, devido ao melhor empacotamento dos grãos e menor índice de vazios produziu concretos com maiores massas específicas, quando comparados aos concretos com agregado uniforme.

Do mesmo modo que ocorreu na compactação dos corpos de prova cilíndricos, verifica-se na Figura 65 que os pontos estão fora das curvas de ajustes, e que o com o aumento do número de golpes há um aumento da massa específica.

De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, verificou-se que o número de golpes, a distribuição granulométrica e o tamanho do agregado influenciaram na massa específica dos concretos moldados em corpos de prova prismáticos, com exceção dos concretos com brita zero, onde o número de golpes e a distribuição granulométrica não influenciaram significativamente, ou seja, as massas específicas são estatisticamente iguais. A distribuição χ^2 ou qui-quadrado, grau de liberdade e p-valor, que indica entre quais concretos existe uma diferença significativa das massas específicas, são apresentados no APÊNDICE 18.

4.2.2.2 Energia de compactação

Os resultados da energia de compactação calculados em corpos de prova cilíndrico e prismáticos, o volume final de concreto compactado e as respectivas massas específicas obtidas na Etapa Final, são apresentados na Tabela 24.

Analisando a Tabela 24, verifica-se que nos corpos de prova cilíndrico a energia de compactação para os concretos produzidos variou no intervalo de 3962 a 22578 J/m³ e nos corpos de prova prismáticos 0 a 5401 J/m³, valores superiores aos aplicados por Ghafoori e Dutta (1995), que foram entre 0 e 268 J/m³, no entanto, com a faixa de valores das massas específicas similares as encontradas pelos autores que foi entre 1500 kg/m³ a 2000 kg/m³.

Tabela 24- Influência do procedimento de compactação na energia de compactação.

Corpos de prova cilíndrico (100 x 200 mm)					Corpos de prova prismático (100 x 100 x 400 mm)				
SIGLA	Nº de golpes*	V(m³)**	E (J/m³)	ρ (kg/m³)***	Procedimento de compactação correspondente	Nº de golpes*	V(m³)**	E (J/m³)	ρ (kg/m³)***
B1-D.10G	10	0,001924	3962,63	1880,04	B1-D.10G	0	0,003600	0,00	1913,73
B1-D.20G	20	0,001846	8262,51	1956,42	B1-D.20G	3	0,003200	714,84	1935,18
B1-D.30G	30	0,001767	12944,60	1983,52	B1-D.30G	5	0,003000	1270,83	1998,09
B1-D.40G	40	0,001728	17651,73	2087,09	B1-D.40G	7	0,003000	1779,17	2079,09
B1-D.50G	50	0,001689	22577,79	2120,69	B1-D.50G	11	0,002800	2995,54	2132,89
B1-U.10G	10	0,001885	4045,19	1857,34	B1-U.10G	0	0,003600	0,00	1886,43
B1-U.20G	20	0,001846	8262,51	1931,03	B1-U.20G	1	0,003400	224,26	1919,24
B1-U.30G	30	0,001806	12663,20	1976,01	B1-U.30G	3	0,003200	714,84	1938,07
B1-U.40G	40	0,001767	17259,47	2086,22	B1-U.40G	7	0,003000	1779,17	2075,72
B1-U.50G	50	0,001767	21574,34	2112,54	B1-U.50G	9	0,003000	2287,50	2103,88
B0-D.10G	10	0,001885	4045,19	1975,67	B0-D.10G	0	0,003600	0,00	1993,11
B0-D.20G	20	0,001806	8442,13	2042,80	B0-D.20G	2	0,003400	448,53	2039,71
B0-D.30G	30	0,001767	12944,60	2116,86	B0-D.30G	7	0,003000	1779,17	2113,86
B0-D.40G	40	0,001728	17651,73	2155,83	B0-D.40G	13	0,002400	4130,21	2141,16
B0-D.50G	50	0,001728	22064,66	2204,80	B0-D.50G	17	0,002400	5401,04	2186,69
B0-U.10G	10	0,001924	3962,63	1956,07	B0-U.10G	0	0,003600	0,00	1986,50
B0-U.20G	20	0,001846	8262,51	2021,58	B0-U.20G	3	0,003000	762,50	2022,79
B0-U.30G	30	0,001767	12944,60	2091,07	B0-U.30G	9	0,002800	2450,89	2066,64
B0-U.40G	40	0,001767	17259,47	2123,30	B0-U.40G	13	0,002400	4130,21	2112,26
B0-U.50G	50	0,001689	22577,79	2165,38	B0-U.50G	17	0,002400	5401,04	2165,18

* Nº de golpes aplicados com Proctor de 2,5 kg; ** Volume final do concreto após compactação; Massa específica no estado fresco.

Fonte: Autora (2017).

Na Figura 66 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na energia de compactação dos corpos de prova cilíndricos, juntamente com as curvas de regressão calculadas pela Equação 11, que para o intervalo de dados apresentados, são lineares.

$$E(n) = \alpha * n \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

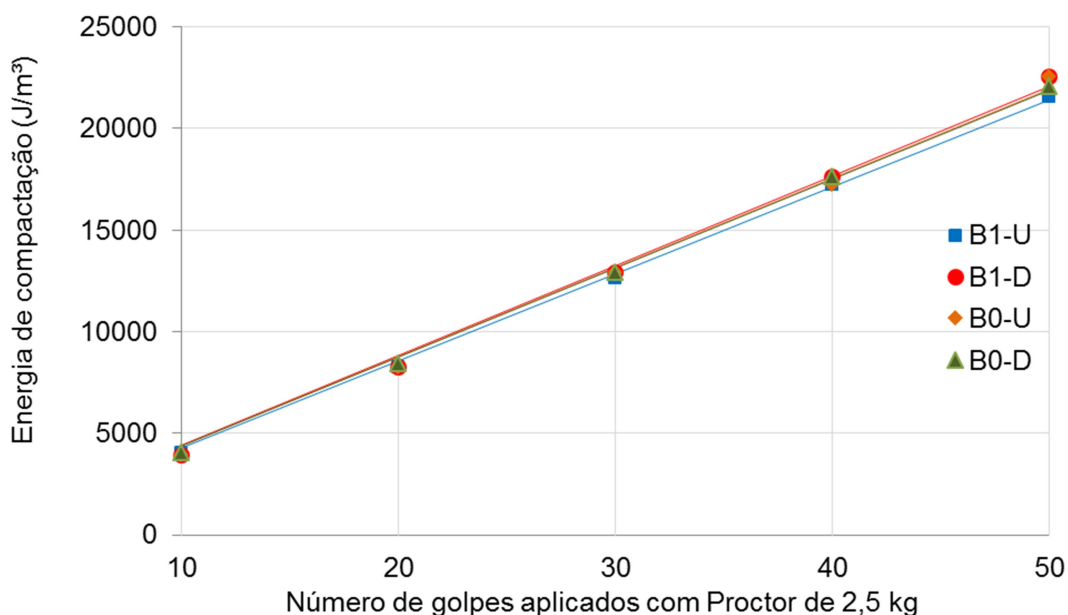
n - número de golpes aplicado;

$E(n)$ - Energia de compactação para n número de golpes;

α - coeficiente angular da reta.

No APÊNDICE 19, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 66, esses parâmetros foram obtidos por meio do software SPSS.

Figura 66- Influência do procedimento de compactação na energia de compactação dos concretos moldados em corpos de prova cilíndrico



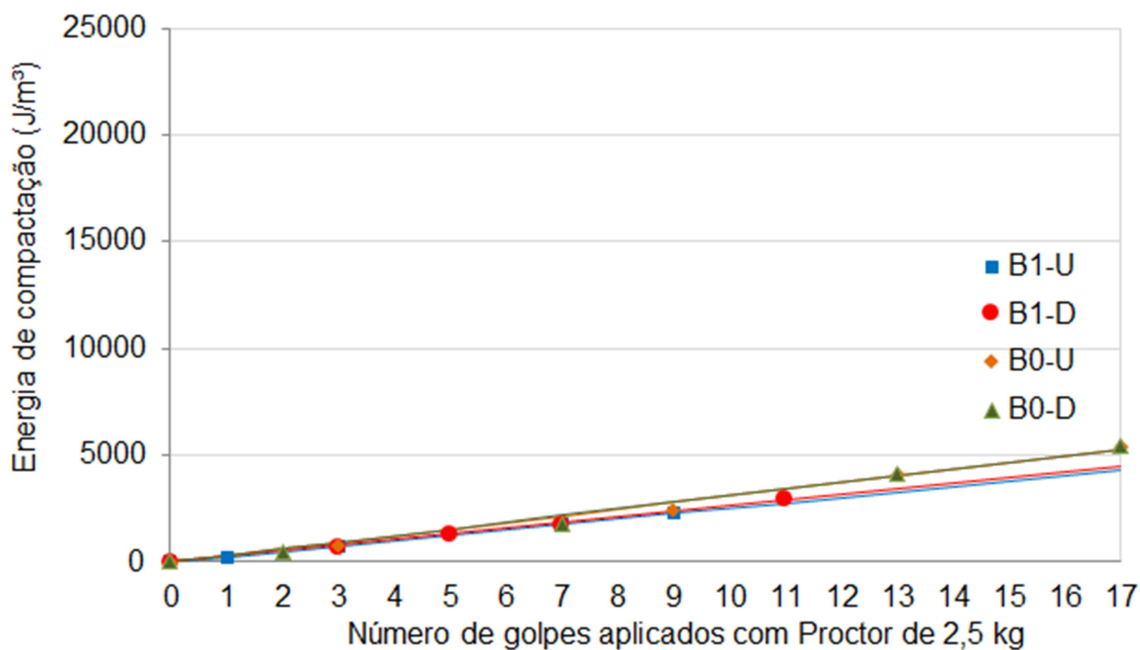
Fonte: Autora (2017).

Comparando os valores de α apresentados no APÊNDICE 19, para as granulometrias B1-D, B1-U, B0-D e B0-U, observa-se que eles são muito parecidos (441,486, 428,126, 437,624 e 438,633), ou seja, para as granulometrias estudadas a relação da energia com o número de golpes é muito similar. Isto é evidenciado na Figura 66, onde os pontos e as regressões, são praticamente uma reta.

Diante disso, como a relação entre a energia de compactação e o número de golpes é linear para o intervalo de dados apresentado, não é necessário comparar a energia de compactação com a massa específica a porcentagem de vazios, a permeabilidade e a resistência à compressão, uma vez que estes serão comparados com o número de golpes, informação mais útil em laboratório.

Na Figura 67 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na energia de compactação dos corpos de prova prismáticos, juntamente com as curvas de regressão calculadas pela Equação 11 (Item 4.2.2.2), que para o intervalo de dados apresentados, são lineares.

Figura 67- Correlação entre energia de compactação de concretos permeáveis com quatro granulometrias de agregado graúdo e o número de golpes aplicados com Proctor de 2,5 em corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autora (2017).

No APÊNDICE 19, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 67, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Observa-se na Figura 67, que para as granulometrias avaliadas, com o aumento do número de golpes, maior é a energia de compactação aplicada nos concretos. E assim como ocorreu nos corpos de prova cilíndricos, a relação entre energia de compactação para as granulometrias B1-D, B1-U, B0-D e B0-U é praticamente uma reta, e muito similar ao apresentado na Figura 68. Deste modo, não se faz necessário relacionar a energia de compactação com as propriedades avaliadas nos corpos de prova prismáticos, visto que as mesmas serão correlacionadas com o número de golpes aplicados com Proctor de 2,5 kg.

De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, verificou-se que existe diferença significativa entre as energias de compactação, ou seja, o número de golpes, o tamanho e distribuição granulométrica do agregado exercem influência significativa nessa propriedade, com exceção dos concretos com brita 1, moldados em corpos de prova prismáticos, que tem sua energia de compactação consideradas

estatisticamente iguais. A distribuição χ^2 ou qui-quadrado, grau de liberdade e p-valor resultados desse teste são apresentados no APÊNDICE 20.

4.2.2.3 Porcentagem de vazios

Os resultados da porcentagem de vazios dos concretos permeáveis compactados em corpos de prova cilíndrico e prismáticos são apresentados a seguir. Cabe ressaltar que nos corpos de prova cilíndricos além da porcentagem de vazios (porosidade aberta), foram avaliadas a porosidade fechada e total.

4.2.2.3.1 Corpos de prova cilíndricos

A porcentagem de vazios, obtida mediante a avaliação aos 27 dias dos 14 corpos de prova cilíndricos por mistura de concreto permeável é apresentada na Tabela 25, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 25- Porcentagem de vazios média no estado fresco para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos

Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Porcentagem de vazios média (%)*	24,15	23,35	21,61	17,45	16,25
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,84	1,74	1,41	0,92	1,70
Coeficiente de Variação (%)	7,63	7,44	6,52	5,29	10,46
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Porcentagem de vazios média (%)*	26,79	24,17	22,27	18,32	17,63
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,09	1,44	1,08	1,30	0,99
Coeficiente de Variação (%)	4,07	5,96	4,83	7,12	5,60
Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Porcentagem de vazios média (%)*	23,05	20,82	17,58	17,18	13,53
Desvio Padrão (kg/m ³)	0,98	0,98	0,68	1,02	1,04
Coeficiente de Variação (%)	4,25	4,70	3,84	5,95	7,72
Procedimento de compactação	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Porcentagem de vazios média (%)*	25,02	22,60	19,61	18,20	15,50
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,02	0,81	1,39	1,28	1,43
Coeficiente de Variação (%)	4,06	3,61	7,10	7,01	9,26

* Resultado médio de 14 determinações.

Fonte: Autora (2017)

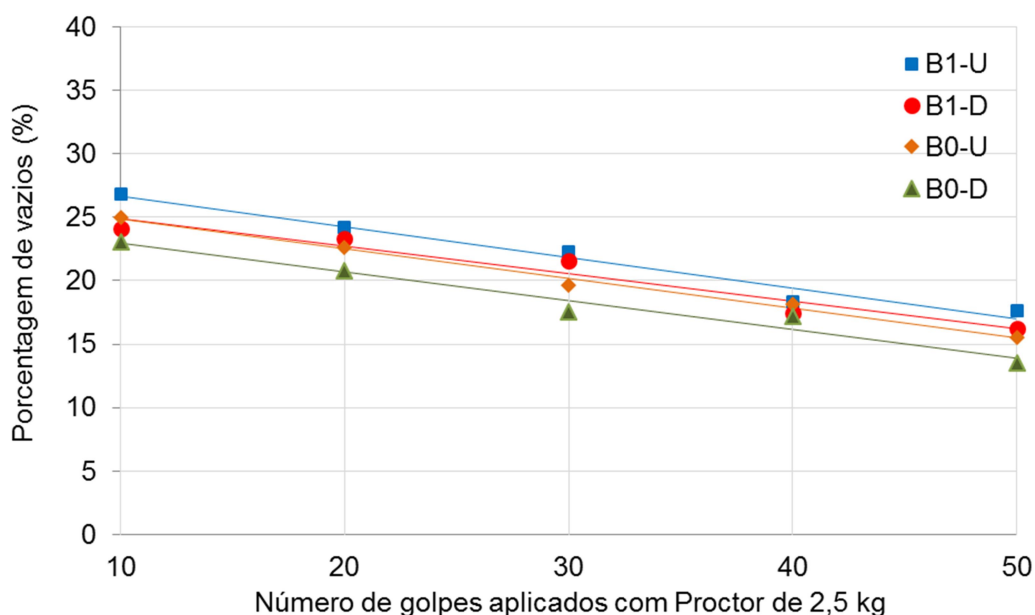
Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 25 constam no APÊNDICE 21.

Observa-se na Tabela 25 que foram produzidos concretos com porcentagem de vazios entre 14 e 27%, sendo o menor valor obtido no procedimento B0-D.50G, abaixo do que se encontra na literatura que é 15%. Além da quantidade de golpes aplicados durante o procedimento de compactação, a combinação do uso do agregado de menor dimensão máxima característica e da granulometria descontínua, colaboraram para a obtenção desse valor.

Os valores são similares aos resultados de Gaedicke, Marines e Miankodila (2014), que para massas específicas entre 1700 a 2200 kg/m³ verificaram concretos com 10 a 30% de vazios.

Na Figura 68 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável produzido em corpos de prova cilíndrico, juntamente com as curvas de regressão calculadas pela Equação 10, no entanto adaptada para esta propriedade.

Figura 68- Influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Autora (2017).

No APÊNDICE 22, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 68, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Verifica-se que quanto maior o número de golpes aplicados, menos vazios apresentaram os concretos estudados, sendo que quando aplicados 40 golpes os concretos apresentaram porcentagens de vazios semelhantes.

Com relação ao tamanho do agregado, verifica-se em alguns pontos e pelas curvas de ajuste que o uso da brita 1 produz concretos com mais vazios quando comparados aos produzidos com brita 0 (exceto nos concretos compactados com 10 e 40 golpes) e que o uso do agregado de granulometria uniforme produz concretos com mais vazios que a granulometria contínua.

Por meio da análise estatística, apresentada no APÊNDICE 23, verificou-se que os concretos produzidos com granulometrias diferentes (uniforme e descontínua), possuem porcentagens de vazios estatisticamente diferentes. Com relação ao tamanho, apenas no concreto produzido com 40 golpes não houve influência do fator na propriedade avaliada. Por fim, analisando isoladamente o efeito do número de golpes, para a brita 1 são considerados concretos com a mesma porcentagem de vazios aqueles que receberam 20 e 30 golpes, 40 e 50 golpes e para a brita zero apenas os concretos que receberam 30 e 40 golpes.

4.2.2.3.1.1 Porosidade aberta, fechada e total

Dos 14 corpos de prova cilíndrico por mistura, 7 corpos de prova tiveram além da porosidade aberta e total verificadas, e por meio da Equação 3 (Item 2.3.2.1), calculada a porosidade fechada.

Na Tabela 26 apresentam-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da porosidade aberta, total e fechada, e no APÊNDICE 24, os valores individuais que resultaram nesses valores.

Tabela 26- Porosidade aberta, fechada e total média dos concretos permeáveis.

Propriedade	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)
Procedimento de compactação	B1-D-10G			B1-D.20G		
Média (%)	24,29	37,20	12,91	22,70	32,48	9,78
Desvio Padrão (%)	1,60	1,97	2,28	1,73	2,00	1,08
Coefficiente de Variação (%)	6,58	5,31	17,63	7,64	6,17	11,02
Procedimento de compactação	B1-D.30G			B1-D.40G		
Média (%)	21,70	31,37	9,67	17,06	27,62	10,56
Desvio Padrão (%)	1,66	1,37	0,46	1,06	1,20	0,73
Coefficiente de Variação (%)	7,64	4,37	4,76	6,21	4,36	6,93
Procedimento de compactação	B1-D.50G			B1-U-10G		
Média (%)	15,76	26,43	10,67	27,24	36,60	9,37
Desvio Padrão (%)	2,08	2,30	0,29	0,72	1,09	0,75
Coefficiente de Variação (%)	13,19	8,69	2,70	2,64	2,98	8,01
Procedimento de compactação	B1-U.20G			B1-U.30G		
Média (%)	23,37	33,46	10,09	22,43	31,56	9,13
Desvio Padrão (%)	1,41	2,25	1,27	1,19	1,28	0,26
Coefficiente de Variação (%)	6,01	6,72	12,62	5,29	4,05	2,80
Procedimento de compactação	B1-U.40G			B1-U.50G		
Média (%)	18,54	30,08	11,54	17,43	29,40	11,97
Desvio Padrão (%)	1,09	1,10	0,36	1,32	1,13	0,53
Coefficiente de Variação (%)	5,89	3,66	3,13	7,59	3,83	4,44
Procedimento de compactação	B0-D-10G			B0-D.20G		
Média (%)	22,80	36,19	13,39	20,71	32,80	12,08
Desvio Padrão (%)	1,06	0,88	0,30	1,12	0,97	0,32
Coefficiente de Variação (%)	4,65	2,43	2,21	5,42	2,95	2,65
Procedimento de compactação	B0-D.30G			B0-D.40G		
Média (%)	17,55	29,44	11,89	17,47	29,78	12,31
Desvio Padrão (%)	0,74	1,08	0,62	0,45	0,79	1,08
Coefficiente de Variação (%)	4,24	3,68	5,24	2,59	2,65	8,77
Procedimento de compactação	B0-D.50G			B0-U-10G		
Média (%)	13,01	23,75	10,74	24,76	36,91	12,15
Desvio Padrão (%)	1,19	2,22	1,24	0,76	0,84	0,27
Coefficiente de Variação (%)	9,16	9,33	11,51	3,08	2,27	2,22
Procedimento de compactação	B0-U.20G			B0-U.30G		
Média (%)	22,24	33,01	10,76	19,79	30,98	11,20
Desvio Padrão (%)	0,61	0,66	0,88	1,02	1,19	0,44
Coefficiente de Variação (%)	2,73	2,01	8,14	5,16	3,84	3,96
Procedimento de compactação	B0-U.40G			B0-U.50G		
Média (%)	18,35	30,84	12,49	14,77	26,83	12,06
Desvio Padrão (%)	1,27	0,99	0,47	1,27	1,44	0,41
Coefficiente de Variação (%)	6,94	3,20	3,77	8,58	5,35	3,41

*Resultado médio de 7 determinações.

Fonte: Autora (2017).

Analisando a Tabela 26 verifica-se que a porosidade total varia entre 24 a 37%, e que similarmente a porosidade aberta, responsável pela infiltração da

água pelo concreto, os maiores valores são verificados nos concretos produzidos com agregado uniforme. A influência do tamanho do agregado sobre a porosidade total não foi evidenciada.

4.2.2.3.2 *Corpos de prova prismáticos*

A porcentagem de vazios é apresentada na Tabela 27, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 27- Porcentagem de vazios média dos concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.

Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes
Porcentagem de vazios média (%)*	33,28	32,91	32,21	28,67	28,02
Desvio padrão (%)	0,72	1,00	1,04	0,42	0,69
Coeficiente de variação (%)	2,18	3,02	3,22	1,45	2,47
Procedimento de compactação correspondente	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
Porcentagem de vazios média (%)*	38,74	37,68	35,89	34,11	32,25
Desvio padrão (%)	0,61	0,27	0,24	2,83	1,77
Coeficiente de variação (%)	1,57	0,71	0,66	8,28	5,48
Procedimento de compactação correspondente	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes
Porcentagem de vazios média (%)*	33,07	31,68	30,83	27,71	26,31
Desvio padrão (%)	0,09	1,18	0,98	0,27	1,19
Coeficiente de variação (%)	0,26	3,74	3,18	0,96	4,52
Procedimento de compactação correspondente	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
Porcentagem de vazios média (%)*	34,38	33,92	33,69	29,28	29,02
Desvio padrão (%)	0,78	0,35	1,05	0,78	1,63
Coeficiente de variação (%)	2,26	1,03	3,12	2,67	5,63

* Resultado médio de 4 determinações.

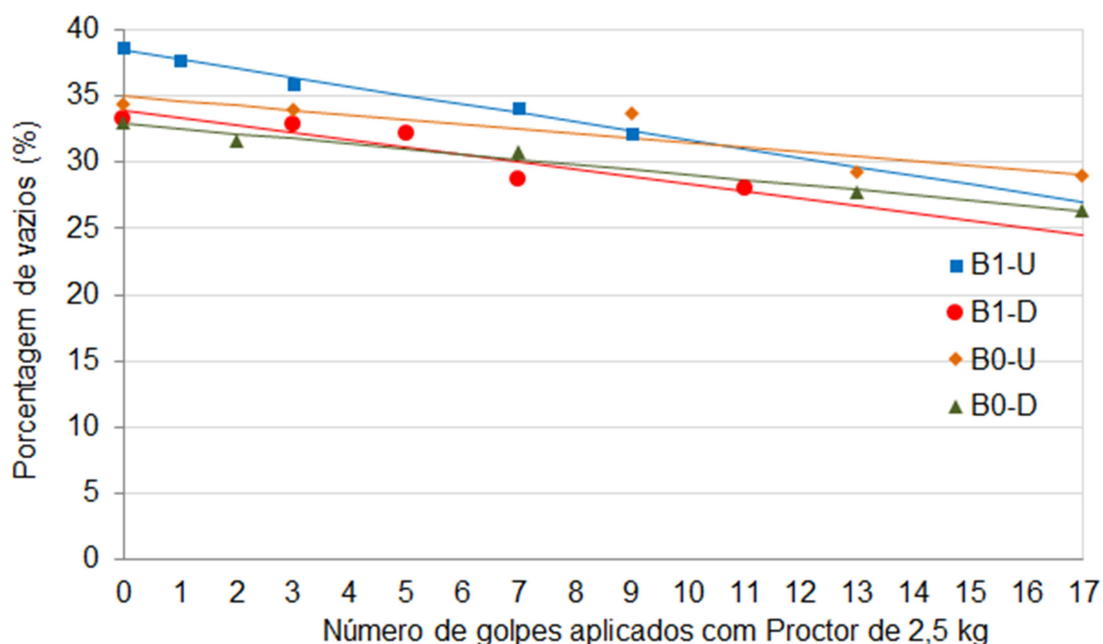
Fonte: Autora (2017).

Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 27 constam no APÊNDICE 21.

Observam-se na Tabela 27 que foram produzidos concretos com porcentagem de vazios entre 26 e 39%, valores superiores ao verificados nos corpos de prova cilíndricos, que foram entre 14 e 27%.

Na Figura 69 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável produzido em corpos de prova prismático.

Figura 69- Influência do procedimento de compactação na porcentagem média de vazios do concreto permeável com diferentes granulometrias de agregado graúdo em corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autora (2017).

No APÊNDICE 22, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 69, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Verifica-se em vários pontos, assim como no concreto moldado em corpos de prova cilíndricos, a tendência do concreto apresentar mais vazios quando produzidos com o agregado maior (brita um) e granulometria uniforme.

De acordo com o teste de Kruskal-Wallis, para os concretos com mesmo tamanho de agregado e distribuição granulométrica, o número de golpes aplicados não influenciou significativamente na porcentagem de vazios, ou seja

podem ser considerados estatisticamente iguais. A distribuição χ^2 ou qui-quadrado, grau de liberdade e p-valor resultados desse teste são apresentados no APÊNDICE 23.

4.2.2.4 Coeficiente de Permeabilidade

Os resultados médios do coeficiente de permeabilidade avaliados em corpos de prova cilíndricos são apresentados na Tabela 28, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 28- Coeficiente de permeabilidade para os concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.

Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Coeficiente de permeabilidade média (mm/s)*	12,26	10,59	8,31	5,65	3,66
Desvio Padrão (mm/s)	1,90	2,57	2,07	2,15	1,33
Coeficiente de Variação (%)	15,46	24,28	24,97	37,98	36,28
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Coeficiente de permeabilidade média (mm/s)*	12,47	11,55	8,72	6,27	5,89
Desvio Padrão (mm/s)	2,73	2,09	3,06	0,97	1,25
Coeficiente de Variação (%)	21,92	18,09	35,05	15,43	21,27
Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Coeficiente de permeabilidade média (mm/s)*	9,97	9,55	5,26	5,05	2,54
Desvio Padrão (mm/s)	1,41	1,75	0,92	0,92	1,27
Coeficiente de Variação (%)	14,11	18,34	17,47	18,24	49,93
Procedimento de compactação	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Coeficiente de permeabilidade média (mm/s)*	11,78	10,37	6,84	5,60	5,00
Desvio Padrão (mm/s)	1,23	1,89	1,72	1,36	1,64
Coeficiente de Variação (%)	10,43	18,19	25,14	24,32	32,77

* Resultado médio de 7 determinações.

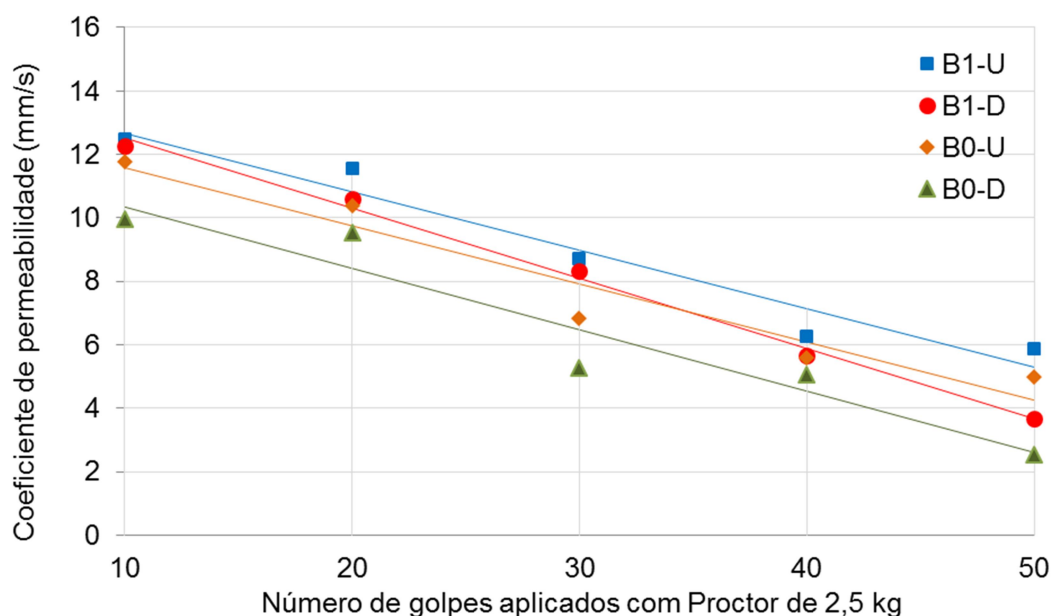
Fonte: Autora (2017).

Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 28 constam no APÊNDICE 25.

Observa-se na Tabela 28 que foram produzidos concretos com coeficientes de permeabilidade entre 3 a 12 mm/s, sendo todos os valores superiores ao valor mínimo exigido pela ABNT NBR 16416:2015, que é 1 mm/s.

Na Figura 70 é ilustrada a influência do procedimento de compactação no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável produzido em corpos de prova cilíndrico, juntamente com as curvas de regressão. No APÊNDICE 26, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 70, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Figura 70- Influência do procedimento de compactação no coeficiente de permeabilidade produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que para todas as granulometrias de agregado graúdo, quanto maior o número de golpes aplicados durante o procedimento de compactação mais baixo é o valor do coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis. Além disso, para o mesmo número de golpes, os concretos permeáveis com agregados de granulometria uniformes apresentaram coeficientes de permeabilidade maiores que os produzidos com granulometria descontínua, resultado justificado maior índice de vazios dos agregados uniformes.

Por meio da ANOVA fatorial, apresentado no APÊNDICE 27, é possível afirmar que o tamanho da brita produz concretos com coeficientes de permeabilidade estatisticamente diferentes. Cabe ressaltar que a distribuição granulométrica não influenciou nessa propriedade, pois com exceção do concreto produzido com 50 golpes e brita uniforme, os demais apresentaram coeficientes de

permeabilidade iguais, corroborando com os resultados obtidos por Huang *et al.* (2010). E ao analisar o número de golpes, verifica-se que este fator influencia nesta propriedade, pois os concretos compactados com 10 e 20 golpes, 30 e 40 golpes são considerados iguais, assim com os concretos com agregado uniforme compactados com 40 e 50 golpes.

4.2.2.5 Resistência à compressão

Os resultados médios da resistência à compressão dos concretos moldados em corpos de prova cilíndricos, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação, são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29- Resistência à compressão dos concretos produzidos nos corpos de prova cilíndricos.

Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Resistência à compressão média (MPa)*	7,38	9,90	11,78	15,72	15,81
Desvio Padrão (MPa)	0,60	1,47	2,63	1,98	2,97
Coeficiente de Variação (%)	8,07	14,81	22,31	12,62	18,78
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Resistência à compressão média (MPa)*	6,92	8,25	11,59	12,23	12,40
Desvio Padrão (MPa)	0,95	1,47	2,57	2,65	1,20
Coeficiente de Variação (%)	13,72	17,87	22,15	21,65	9,67
Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Resistência à compressão média (MPa)*	8,81	10,42	13,74	14,82	19,16
Desvio Padrão (MPa)	0,97	0,97	1,32	2,08	1,88
Coeficiente de Variação (%)	11,04	9,28	9,59	14,04	9,84
Procedimento de compactação	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Resistência à compressão média (MPa)*	7,87	10,39	13,51	14,55	14,55
Desvio Padrão (MPa)	1,44	0,65	0,98	1,52	2,42
Coeficiente de Variação (%)	18,31	6,28	7,24	10,42	16,63

* Resultado médio de 7 determinações.

Fonte: Autora (2017).

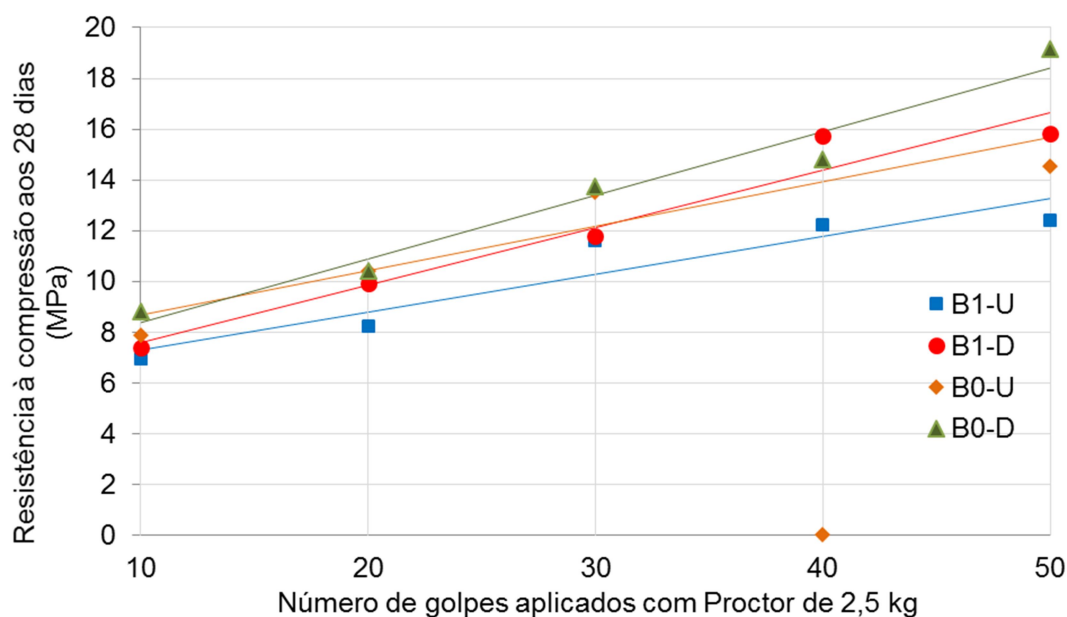
Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 29 constam no APÊNDICE 28.

Observa-se na Tabela 29 que foram produzidos concretos valores entre 7 a 19 MPa, estando esses valores dentro da faixa recomendada na literatura, e similares aos valores encontrados pelos autores Meininger (1988) e Mahboub *et al.* (2009).

Na Figura 71 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na resistência à compressão do concreto permeável produzido em corpos de prova cilíndrico, juntamente com as curvas de regressão.

No APÊNDICE 29, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 71, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Figura 71- Influência do procedimento de compactação na resistência à compressão média aos 28 dias dos concretos permeáveis produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se na Figura 71, dentro do intervalo avaliado, uma correlação linear entre a resistência à compressão e o número de golpes, e à medida que aumentam-se o número de golpes durante o procedimento de compactação, maior é a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.

Com relação ao agregado graúdo, o uso da brita descontínua e zero, com exceção os procedimento B0-D.40G e B1-D.40G, produziram concretos com

resistência à compressão maior quando comparados aos concretos com brita uniforme e um.

Por meio do teste de Kruskal-Wallis, pode-se afirmar que o número de golpes e a granulometria do agregado graúdo influenciam na resistência à compressão do concreto. A distribuição χ^2 ou qui-quadrado, grau de liberdade e p-valor resultados desse teste são apresentados no APÊNDICE 30.

4.2.2.6 Resistência à tração na flexão

Os resultados médios da resistência à tração na flexão obtido nos concretos permeáveis moldados em corpos de prova prismáticos são apresentados na Tabela 30, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os valores individuais que resultaram nos valores médios apresentados na Tabela 30 constam no APÊNDICE 31.

Tabela 30- Coeficiente de permeabilidade para os concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.

Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes
Resistência à tração na flexão média (MPa)*	1,63	1,66	1,68	1,88	1,93
Desvio Padrão (MPa)	0,07	0,23	0,17	0,15	0,21
Coeficiente de Variação (%)	0,45	1,41	1,04	0,79	1,11
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpe	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
Resistência à tração na flexão média (MPa)*	1,48	1,50	1,59	1,64	1,71
Desvio Padrão (MPa)	0,27	0,15	0,25	0,26	0,29
Coeficiente de Variação (%)	1,85	1,01	1,60	1,61	1,72
Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes
Resistência à tração na flexão média (MPa)*	1,64	1,65	1,68	1,94	2,16
Desvio Padrão (MPa)	0,23	0,21	0,13	0,22	0,17
Coeficiente de Variação (%)	1,42	1,25	0,79	1,12	0,79

Continua

Tabela 30- Coeficiente de permeabilidade para os concretos produzidos nos corpos de prova prismáticos.

Procedimento de compactação	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
Resistência à tração na flexão média (MPa)*	1,58	1,61	1,65	1,92	2,11
Desvio Padrão (MPa)	0,10	0,13	0,31	0,08	0,26
Coeficiente de Variação (%)	0,63	0,78	1,91	0,42	1,21

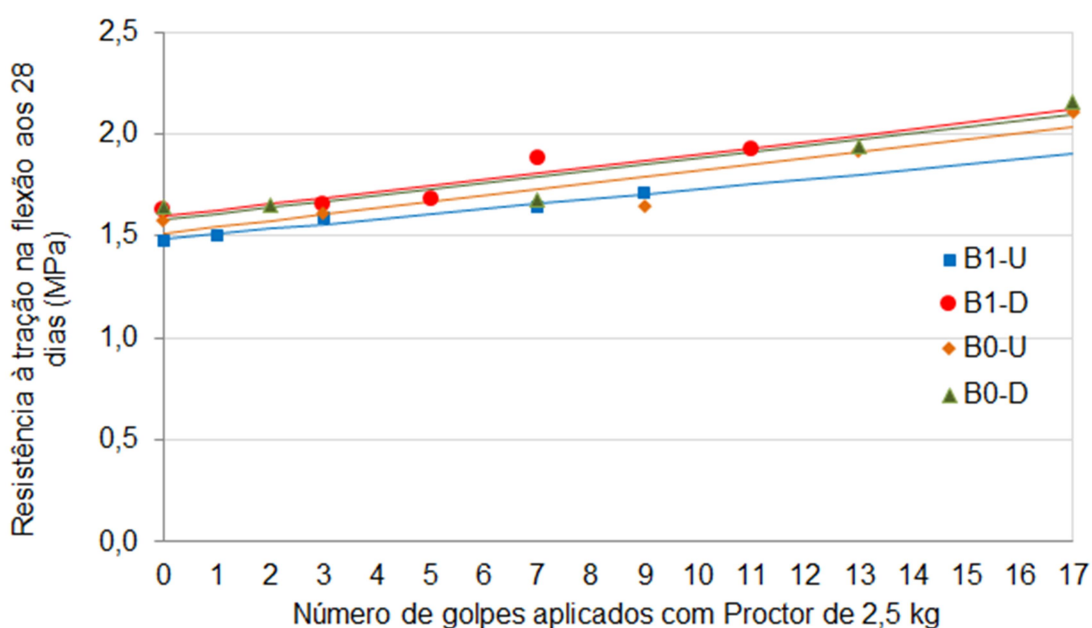
* Resultado médio de 7 determinações.

Fonte: Autora (2017).

Observa-se na Tabela 30 que foram produzidos concretos valores entre 1 a 2 MPa, estando esses valores dentro da faixa encontrada na literatura. De acordo com a ABNT NBR 16416: 2015 todos os concretos produzidos podem ser utilizados para tráfego de pedestres, enquanto apenas os concretos produzidos com brita 0 e receberam ambos 17 golpes (B0-D.50G e B0-U.50G), por apresentarem valores superior a 2 MPa podem ser utilizados no tráfego leve.

Na Figura 72 é ilustrada a influência do procedimento de compactação na resistência à tração na flexão média aos 28 dias dos concretos permeáveis, juntamente com as curvas de regressão.

Figura 72- Influência do procedimento de compactação na resistência à tração flexão média aos 28 dias dos concretos permeáveis produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo.



Fonte: Autora (2017).

No Apêndice 32, são apresentados os parâmetros estimados que resultaram nas curvas de regressão ilustradas na Figura 72, sendo os parâmetros obtidos por meio do software SPSS.

Verifica-se na Figura 72, que os valores mais baixos para a resistência à tração na flexão foram obtidos para as granulometrias uniformes, enquanto o uso do agregado de menor dimensão máxima característica, brita zero, predominantemente produziu concretos com valores mais elevados para essa propriedade.

Como os valores são próximos, aplicou-se uma ANOVA *One way*, para verificar se o número de golpes e a granulometria do agregado graúdo, influenciam na resistência à tração na flexão dos concretos permeáveis, e os resultados são apresentados no APÊNDICE 33. Verificou-se o número de golpes não influenciou significativamente na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com o mesmo agregado.

4.2.2.7 Correlações entre as propriedades

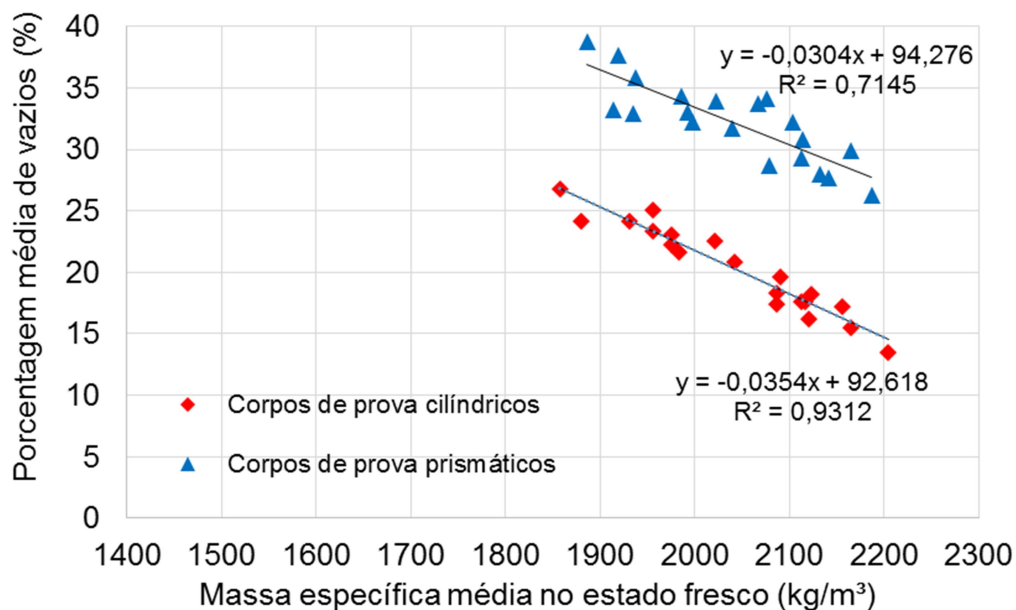
Para melhor interpretar os resultados da Etapa Final realizou-se a análise de correlações entre as propriedades avaliadas nos mesmos corpos de prova:

- Massa específica e porcentagem de vazios;
- Coeficiente de permeabilidade x porcentagem de vazios x resistência à compressão;
- Porcentagem de vazios x resistência à tração na flexão;
- Resistência à tração na flexão x massa específica no estado fresco.

4.2.2.7.1 *Massa específica no estado fresco x porcentagem de vazios*

Na Figura 73 é apresentada a correlação entre a porcentagem média de vazios, ou porosidade aberta e a massa específica média no estado fresco, obtidos nos 14 corpos de prova cilíndricos e 4 prismáticos por mistura de concreto permeável.

Figura 73- Correlação entre a massa específica média no estado fresco e percentagem média de vazios em corpos de prova de concreto permeável.



Fonte: Autora (2017).

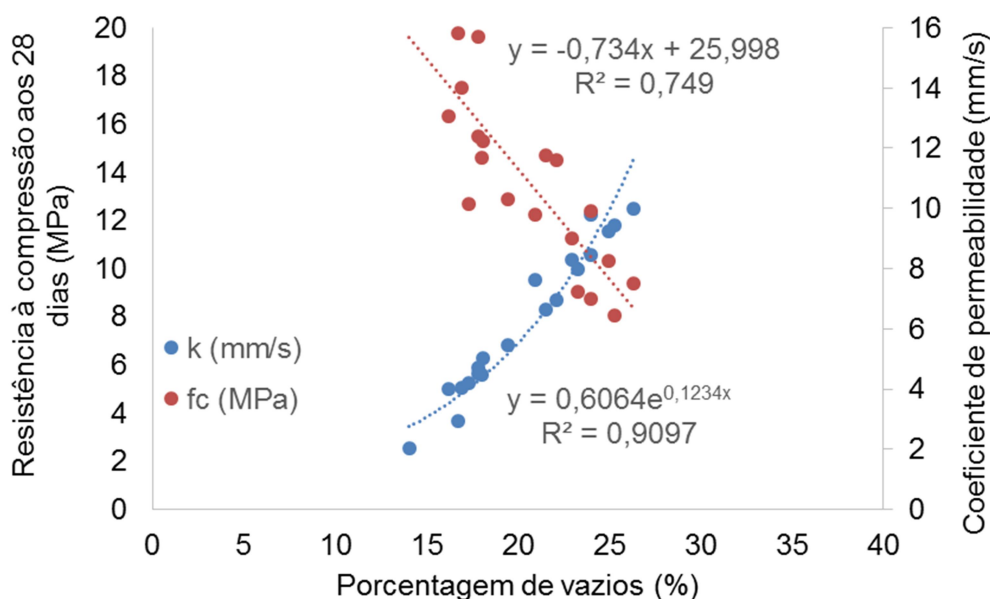
Verifica-se nos concretos moldados em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, que com o aumento da massa específica há uma diminuição da percentagem de vazios, corroborando com os resultados apresentados por Schaefer *et al.* (2006).

Observa-se que concretos moldados em corpos de prova prismáticos devido a menor energia de compactação aplicada, apresentaram percentagem de vazios superiores aos moldados em corpos de prova cilíndricos e uma maior dispersão nos resultados.

4.2.2.7.2 Coeficiente de permeabilidade x percentagem de vazios x resistência à compressão

Na Figura 74 é apresentada a correlação entre o coeficiente de permeabilidade, a percentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade, valores avaliados em 7 corpos de prova cilíndricos por mistura de concreto permeável.

Figura 74- Correlação entre o coeficiente de permeabilidade, a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade em corpos de prova de concreto permeável.



Fonte: Autora (2017).

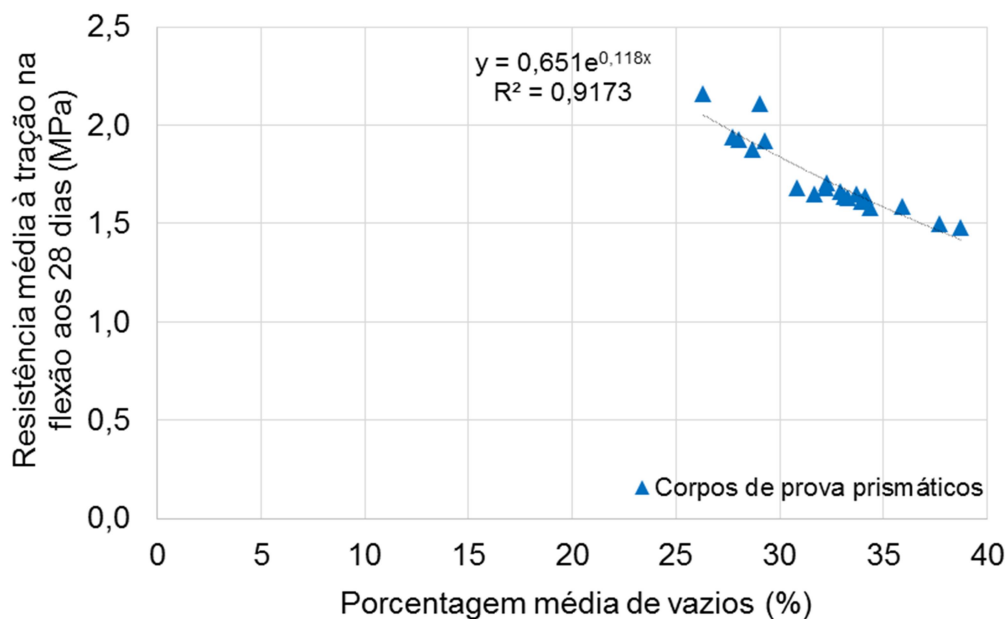
O aumento da porcentagem de vazios nos concretos permeáveis, conforme visto na Figura 74 produz concretos permeáveis com maiores coeficientes de permeabilidade. Resultados similares aos verificados por Solminihac *et al.* (2007) que para concretos com 5 a 30 % de vazios, obtiveram coeficientes de permeabilidade entre 1 e 10 mm/s.

Verifica-se que quanto maior a porcentagem de vazios, menor é a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos permeáveis, corroborando com os resultados verificados por Maguesvari e Narasimha (2013), que para resistência à compressão entre 5 e 30 MPa os concretos apresentaram porcentagens de vazios entre 25 e 45% e coeficientes de permeabilidade entre 4 e 14 mm/s.

4.2.2.7.3 Porcentagem de vazios x resistência à tração na flexão

Na Figura 75 é apresentada a correlação entre a porcentagem de vazios e a resistência à flexão obtidos nos 4 corpos de prova prismático por mistura, onde verifica-se que há uma forte correlação entre as duas propriedades e com o aumento da porcentagem de vazios há uma diminuição na resistência à flexão aos 28 dias para os concretos permeáveis avaliados.

Figura 75- Correlação entre a porcentagem de vazios e a resistência à tração na flexão em corpos de prova de concreto permeável.



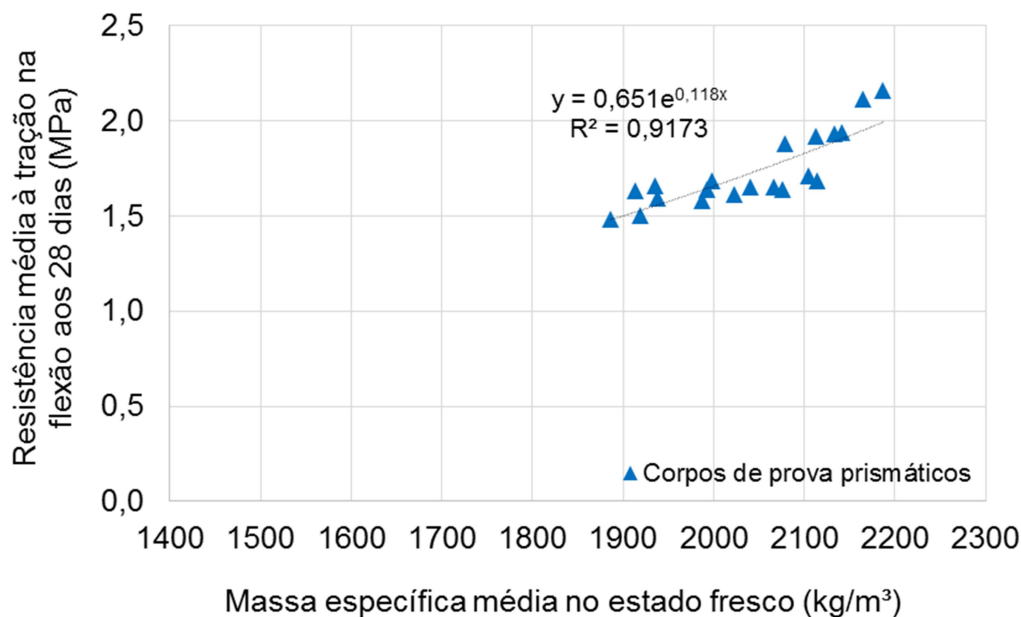
Fonte: Autora (2017).

Castro *et al.* (2009), para porcentagens de vazios entre 5 e 30%, alcançaram resistências à tração na flexão aos 28 dias entre 1,5 a 3,5 MPa, valores superiores aos verificados neste trabalho, e justificados devido aos diferentes teores de pasta utilizados pelos autores.

4.2.2.7.5 Resistência à tração na flexão x massa específica no estado fresco

Na Figura 76 é apresentada a correlação entre a resistência à tração na flexão e massa específica no estado fresco obtidos nos quatro corpos de prova prismático por mistura de concreto permeável.

Figura 76- Correlação entre a resistência à tração na flexão e massa específica no estado fresco em corpos de prova de concreto permeável.



Fonte: Autora (2017).

Verifica-se que com a elevação da massa específica dos concretos permeáveis há um aumento na resistência à tração na flexão aos 28 dias.

4.2.3 Resumo da Etapa Final

Na Tabela 31 são apresentados os resultados médios das propriedades avaliadas nos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final e moldados em sete corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.

Tabela 31- Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.

Procedimento de compactação	Nº de golpes*	ρ (kg/m³)**	Vv (%)	k (mm/s)	fc (MPa)
B1-D.10G	10	1880,67	24,00	12,26	7,01
B1-D.20G	20	1955,47	23,99	10,59	9,90
B1-D.30G	30	1984,67	21,51	8,31	11,78
B1-D.40G	40	2085,50	17,84	5,65	15,72
B1-D.50G	50	2120,32	16,74	3,66	15,81

Continua

Tabela 31- Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.

Procedimento de compactação	Nº de golpes*	ρ (kg/m ³)**	Vv (%)	k (mm/s)	fc (MPa)
B1-U.10G	10	1863,41	26,34	12,47	7,52
B1-U.20G	20	1926,23	24,97	11,55	8,25
B1-U.30G	30	1976,58	22,12	8,72	11,59
B1-U.40G	40	2091,06	18,10	6,27	12,23
B1-U.50G	50	2107,06	17,82	5,89	12,40
B0-D.10G	10	1973,72	23,29	9,97	7,23
B0-D.20G	20	2039,39	20,93	9,55	9,79
B0-D.30G	30	2115,42	17,32	5,26	10,13
B0-D.40G	40	2159,87	16,90	5,05	14,00
B0-D.50G	50	2200,86	14,06	2,54	16,72
B0-U.10G	10	1948,46	25,28	11,78	6,46
B0-U.20G	20	2018,44	22,95	10,37	9,00
B0-U.30G	30	2091,97	19,44	6,84	10,29
B0-U.40G	40	2126,06	18,05	5,60	11,68
B0-U.50G	50	2161,09	16,23	5,00	13,07

*Número de golpes aplicados com Proctor de 2,5 kg; **Massa específica no estado fresco.

Fonte: Autora (2017).

Na Tabela 32 são apresentados os resultados médios das propriedades avaliadas nos concretos permeáveis produzidos na Etapa Final e moldados em quatro corpos de prova de dimensões 100 x 100 x 400 mm.

Tabela 32- Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.

Procedimento de compactação correspondente	Nº de golpes*	ρ (kg/m ³)**	Vv (%)	fct,f (MPa)
B1-D.10G	0	1913,73	33,28	1,63
B1-D.20G	3	1935,18	32,91	1,66
B1-D.30G	5	1998,09	32,21	1,68
B1-D.40G	7	2079,09	28,67	1,88
B1-D.50G	11	2132,89	28,02	1,93
B1-U.10G	0	1886,43	38,74	1,48
B1-U.20G	1	1919,24	37,68	1,50
B1-U.30G	3	1938,07	35,89	1,59
B1-U.40G	7	2075,72	34,11	1,64
B1-U.50G	9	2103,88	32,25	1,71

Continua

Tabela 32- Resumo das propriedades avaliadas na Etapa Final nos corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm.

Procedimento de compactação correspondente	Nº de golpes*	ρ (kg/m ³)**	Vv (%)	fct,f (MPa)
B0-D.10G	0	1993,11	33,07	1,64
B0-D.20G	2	2039,71	31,68	1,65
B0-D.30G	7	2113,86	30,83	1,68
B0-D.40G	13	2141,16	27,71	1,94
B0-D.50G	17	2186,69	26,31	2,16
B0-U.10G	0	1986,50	34,38	1,58
B0-U.20G	3	2022,79	33,92	1,61
B0-U.30G	9	2066,64	33,69	1,65
B0-U.40G	13	2112,26	29,28	1,92
B0-U.50G	17	2168,18	29,02	2,11

*Número de golpes aplicados com Proctor de 2,5 kg; **Massa específica no estado fresco.

Fonte: Autora (2017).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As conclusões baseadas nos dados e pressupostos deste trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir.

5.1 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nas etapas deste trabalho, verifica-se o cumprimento do objetivo geral que era propor um procedimento de compactação para corpos de prova cilíndrico de dimensões 100 x 200 mm e prismáticos de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm em laboratório. Padronizou-se o enchimento dos moldes com controle da massa do concreto; uso de chapa metálica e compactação com o cilindro de Proctor de 2,5 kg, no centro da chapa.

Desse modo, pode-se afirmar que por meio do procedimento de compactação proposto neste estudo, foi possível produzir concretos permeáveis de acordo com os requisitos da ABNT NBR 16416:2015 para uso em pavimentos de tráfego de pedestre, com coeficientes de permeabilidade superior a 1 mm/s e resistência à tração na flexão aos 28 dias superior a 1 MPa. Cabe ressaltar que, a escolha pela quantidade de golpes a ser aplicada durante a compactação em laboratório deve ser definida de acordo com os valores desejados para as propriedades.

Para o intervalo de dados apresentados, verificou-se uma correlação linear entre a energia de compactação e número de golpes. Tendo em vista que em laboratório o número de golpes é uma informação mais útil, do que a energia de compactação, neste trabalho, estimou-se as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável em função do número de golpes.

O número de golpes aplicados durante o procedimento de compactação exerceu influência na massa específica, porcentagem de vazios, coeficiente de permeabilidade e resistência à compressão dos concretos permeáveis, de modo que, com o aumento do número de golpes, maiores foram às massas específicas e a resistência à compressão e menor a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade dos mesmos.

Existe uma correlação não linear entre a massa específica e o número de golpes dos concretos moldado em corpos e prova cilíndrico em massa e

volume; e nos corpos de prova prismáticos que receberam golpes distribuídos na chapa metálica, ou seja, a relação entre a massa específica e o número de golpes é exponencial.

Observou-se que as massas específicas dos concretos produzidos na Etapa Final, encontraram-se distantes das curvas de ajustes obtidas durante o estudo de moldagem e compactação, devido a heterogeneidade do material e a dificuldade em realizar o rasamento do concreto durante o procedimento de moldagem.

Finalmente, com relação ao agregado graúdo, o uso da brita de dimensão máxima característica igual a 12,5 mm (brita 0) e de granulometria descontínua, produziram na maioria das misturas de concretos permeáveis, massas específicas e resistências à compressão e tração na flexão mais elevadas quando comparados aos concretos com agregado uniforme e brita de dimensão máxima característica igual a 19 mm (brita 1).

Para a porcentagem de vazios, o tamanho e a distribuição granulométrica influenciaram na propriedade, sendo, na maioria dos concretos, mais porosos aqueles produzidos com brita de dimensão máxima característica igual a 19 mm (brita 1) e agregado uniforme e para o coeficiente de permeabilidade, a distribuição granulométrica não influenciou significativamente na propriedade, ou seja, com exceção do concreto produzido com 50 golpes e brita uniforme, os demais apresentaram coeficientes de permeabilidade iguais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto têm-se como sugestões para trabalhos futuros:

Com relação ao procedimento de compactação, sugere-se aperfeiçoar o método de rasamento dos corpos de prova e de compactação dos corpos de prova prismático.

Para validar as correlações apresentadas entre número de golpes e as propriedades dos concretos produzidos com as quatro granulometrias de agregado graúdo, sugere-se trabalhar com outros traços de concreto permeável.

Para o ensaio de permeabilidade, sugere-se que seja elaborado um permêmetro a carga constante mais preciso, principalmente com relação à coleta de água.

Por fim, pode-se estudar a correlação entre as propriedades de corpos de prova moldados em laboratório e testemunhos extraídos de placas de concreto permeável por meio de modelagem matemática.

REFERÊNCIAS

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **211.3R**: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. Detroit: American Concrete Institute, p.1-26, 2002.

_____. **522R-06**. Pervious Concrete Pavement. Michigan, 2006.

ANDRADE FILHO, Alceu Gomes de; SZÉLIGA, Marcos Rogério; ENEMOTO, Carolina Ferreira. **Estudo de medidas não-estruturais para controles de inundações urbanas**. Publicatio Uepg. Ponta Grossa, p. 69-90. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Projeto técnico: Pavimento permeável**. p.1-21, 2013.

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

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

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

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

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

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

_____. **8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015a.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

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

_____. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015b.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Passo Fundo, São Paulo, 2013.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. **Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, Junho, 2015.

BHUTTA, M. Amer Rafique.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. **Evaluation of high-performance porous concrete properties**. Construction and Building Materials 31, p.67–73, 2012.

BONICELLI, Alessandra; GIUSTOZZI, Filippo; CRISPINO, Maurizio. **Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete**. Construction and Building Materials, n.91, p.102–110, 2015.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. **An Analysis of Transformations**. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), v. 26, n.2. p.211-252, 1964.

CASTRO, J. *et al.* **Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón**. Revista Ingeniería de Construcción, v.24, n.3, p.271-284, 2009.

CHOPRA, Manoj; WANIELISTA, Marty; MULLIGAN, Ann Marie. **Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete Pavements**. Orlando: Ryan Browne, p. 1-164, 2007.

COLORADO READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (CRMCA). **Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design**. Centennial, p.1-24, 2009.

COSIC, K. *et al.* **Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 78, p.69-76, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>.

CROUCH, L.K. *et al.* **Determining Pervious PCC Permeability with a Simple Triaxial Flexible-Wall Constant Head Permeameter.** United States: Tennessee Concrete Association, p.1-6, 2006.

COUTINHO, Artur Paiva. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife.** 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

DEO, Omkar.; NEITHALATH, Narayanan. **Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities.** Construction and Building Materials 25, p. 4181–4189, 2011.

DHALLA, Sameer; ZIMMER, Cristine. **Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide,** CVC & TRCA, p. 1- 300, 2010.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 1999. **Storm Water Technology Fact Sheet Porous Pavement.** Washington: United States Environmental Protection Agency, p.1-6, 1999.

FARIAS, M.M; PALMEIRA, E.M. **Agregados para a Construção Civil.** In: ISAIA, G.C. (Org). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2013.

FERGUSON, Bruce K. **Porous pavements: the making of progress in technology and design.** 8th International Conference on Concrete Block Paving, p.11 – 16, 2006.

FREITAS, Carlos Machado de; XIMENES, Elisa Francioli. **Enchentes e saúde pública – uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação.** Ciência & Saúde Coletiva, [s. L.], v. 6, n. 17, p.1601-1615, 2012.

FU, Tun Chi *et al.* **The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete.** Advances In Materials Science And Engineering, [s.l.], v. 2014, p.1-17, 2014. Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/963971>.

GAEDICKE, Cristián; MARINES, Armando; MIANKODILA, Farel. **A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete.** Construction and Building Materials, n.52, p.494–503, 2014.

GHAFOORI, Nader; DUTTA, Shivaji. **Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete For Paving Materials.** Journal Of Materials In Civil Engineering, [s.l.], p.183-191, ago. 1995.

HESAMI, Saeid; AHMADI, Saeed; NEMATZADEH, Mahdi. **Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement.** Construction and Building Materials 53, p.680–691, 2014.

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

HUANG, Baoshan *et al.* **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified.** Construction and Building Materials 24, p.818–823, 2010.

IBRAIM, Ahmed *et al.* **Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties.** Construction and Building Materials 50, p.524–529, 2014.

JOSHAGHANI, Alireza; RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar; JABERIZADEH, Mohammad. **Mechanical Characteristic of Pervious Concrete Considering the Gradation and Size of Coarse Aggregates.** Research Journal Of Environmental And Earth Sciences, [s. L.], p.437-442. set. 2014.

KIM, H.K.; LEE, H.K. **Influence of Cement Flow and Aggregate type on the Mechanical and Acoustic Characteristic of Porous Concrete.** Journal of Sound and Vibration. p. 607–615. 2010.

KUOSA, Hannele; NIEMELAINEN, Emma; LOIMULA, Kalle. **Pervious pavement systems and materials – State-of-the- Art.** Overview of international literature on pervious pavements.VTT-R-08222-13. p.1-95. 2013.

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

LUCO, Luis Fernández. **El hormigón poroso: un material innovador para infraestructura vial y urbana.** Carreteras, Buenos Aires, p.52-55, mar. 2000.

LUCO, Luis Fernández, VÍTOLA, Leonardo; SALMINCI, Pablo N. **Estado del arte en uso de hormigones porosos.** Revista Carreteras, Año XLIII, nº 154, agos. 1998.

MAGUESVARI, M. U. NARASIMHA, V.L. **Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications.** Procedia - Social and Behavioral Sciences 104, p.198 – 207, 2013.

MAHBOUB, K. C. *et al.* **Pervious Concrete: Compaction and Aggregate Gradation.** Aci Materials Journal. [detroit], p. 523-528. dez. 2009.

MARIANO, Humberto Rodrigues. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis.** 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

MEININGER, R. **No-fines Pervious Concrete for Paving.** Concrete International, p.21-17, 1998.

METHA, Provindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MONTES, F.; VALAVALA, S.; HASELBACH, L.M. **A New Test Method for Porosity Measurements of Portland cement Pervious Concrete**. Journal of ASTM International. v. 2, n.1, p.1-13. 2005.

NATIONAL READY MIX CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA), 2008, **Pervious concrete**. Silver Spring: Concrete Delivers, p.1-4, 2008.

NEITHALATH, Narayanan; SUMANASOORIYA, Milani S.; DEO, Omkar. **Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction**. Materials Characterization, [s.l.], v. 61, n. 8, p.802-813, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004>.

NEITHALATH, Narayanan; WEISS, Jason; OLEK, Jan. **Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance**. Cement and Concrete Research 36, p. 2074–2085. 2006.

OBLA, K.H. **Pervious Concrete – An overview**. The Indian Concrete Journal, p.9-18, 2010.

OHIO READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (ORMCA). **02795: Specifier's guide for pervious concrete pavement with detention**. Ohio: Ohio Concrete, p.1-19, 2014.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S.h.p.; AGUADO, A. **Evolutionary lattice model for the compaction of pervious concrete in the fresh state**. Construction And Building Materials, Barcelona, p.11-25, ago. 2015.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ed.São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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

PUTMAN, Bradley J.; NEPTUNE, Andrew I. **Comparison of test specimen preparation techniques for perviousconcrete pavements**.Construction and Building Materials 25, p.3480–3485, 2011.

RADLINSKA, Aleksandra *et al.* D. **Long-Term Field Performance ofPervious Concrete Pavement**. Advances in Civil Engineering, p.1-9, 2012.

RAVINDRARAJAH, S. YUKARI, A. **Environmentally friendly pervious concrete for sustainable construction**. 35th Conference on Our world in concrete e structures. p.25 – 27. 2010.

REHDER, Benjamin; BANH, Kingsten; NEITHALATH, Narayanan. **Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers.** Engineering Fracture Mechanics 118, p.1-16, 2014.

SALES, Tarso Luis de. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade.** 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SANDOVAL, Gersson Fernando Barreto. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis.** 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SCHAEFER, Vernon R. *et al.* **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates.** Ames: Center For Transportation Research And Education, p.1-83, 2006.

SOLMINIHAC, H. de *et al.* **Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables: Porous concrete mixtures for pervious urban pavements.** Materiales de Construcción, [s. L.], p.23-36, set. 2007.

SOUZA, Christopher Freire; GONÇALVES, Lidiane Souza; GOLDENFUM, Joel Avruch. **Planejamento integrado de sistemas de drenagem urbana.** [s. L.], 2007.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J.. **Pervious Concrete Pavements.** Maryland: Portland Cement Association, Skokie, Illinois, And National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, p.1-36, 2004.

THAKRE, Nalini. **Comparative Study on Strength and Permeability of Pervious Concrete by Using Nylon and Polypropylene.** International Journal Of Computing And Technology, [s. L.], p.141-148, may, 2014.

TORRES, Anthony ; HU, Jiong; RAMOS, Amy. **The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete.** Construction and Building Materials, n.95, p.850–859, 2015.

TUCCI, Carlos. E. M. **Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil.** REGA, v. 1, n. 1, p. 59-73, jan./jun. 2007.

URBONAS, Ben. **Assessment of Stormwater Best Management Practice Effectiveness.** In: HEANEY, James P.; PITT, Robert; FIELD, Richard. Innovative Urban Wet-Weather Flow Management Systems. Cincinnati: Cooperative Agreement nos, p. 288-333, 2000.

VÉLEZ, Ligia M. **Permeabilidad y Porosidad en Concreto.** Tecno Lógicas, [s. L.], p.169-187, dez. 2010.

VIDAL, Almir dos Santos. **Caracterização de concreto produzido com resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em**

ambiente urbano. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

VIRGILIIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheio.** 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

YANG, Jing; JIANG, Guoliang. **Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials.** Cement And Concrete Research, [s. L.], p.381-386, ago. 2003.

ZHONG,Rui; WILLE, Kay. **Material design and characterization of high performance pervious concrete.** Construction and building materials, p.51-60, 2015.

ZHIFENG, Yang *et al.* **The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material.** Journal of Wuhan University of Technology-Mater, pp. 391-394, abr. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE 1- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	7,04E+24	2,35E+24	49,51	1,97E-10
Erro	24	1,14E+24	4,74E+22		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,000054	0,000009	0,000000
P5.n-2		0,000054		0,875418	0,000005
P10.n-1		0,000009	0,875418		0,000029
P10.n-2		0,000000	0,000005	0,000029	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	1	13394	13394	8,19	0,014308
Erro	12	19626	1636		

APÊNDICE 2- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO ENDURECIDO – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	156398,00	52133,00	49,93	0,000000
Erro	24	25059,00	1044,00		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,000183	0,000176	0,000161
P5.n-2		0,000183		0,785906	0,000176
P10.n-1		0,000170	0,785906		0,000260
P10.n-2		0,000161	0,000176	0,000260	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	1	13252,00	13252,00	7,95	0,015454
Erro	12	19995,00	1666,00		

APÊNDICE 3- ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE AS MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Teste de Student					
Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	GL	t	p-valor
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	1889,90	82,18			
Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	1883,13	81,98	27	10,57	0,000000
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	GL	t	p-valor
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	1927,60	50,40			
Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	1883,13	50,57	13	6,95	0,000010

APÊNDICE 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELO MÉTODO DE BATEZINI – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	296,23	98,74	39,80	0,000000
Erro	24	59,54	2,48		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,00022	0,000161	0,000161
P5.n-2		0,000220		0,433722	0,000277
P10.n-1		0,000161	0,433722		0,005887
P10.n-2		0,000161	0,000277	0,005887	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	1	52,96	52,96	34,31	0,000077
Erro	12	18,52	1,54		

APÊNDICE 5 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELO MÉTODO DE SAND – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	9926,00	33,09	19,14	0,000001
Erro	24	41,50	1,73		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,000226	0,000608	0,000161
P5.n-2		0,000226		0,874528	0,304514
P10.n-1		0,000608	0,874528		0,079111
P10.n-2		0,000161	0,304514	0,079111	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	1	34,96	34,96	113,87	0,000000
Erro	12	3,68	0,31		

APÊNDICE 6 – ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE A PORCENTAGEM DE VAZIOS PELOS MÉTODOS BATEZINI E SANDOVAL – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Teste de Student					
Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	GL	t	p-valor
Porcentagem de vazios (Batezini)	27,76	3,63			
Porcentagem de vazios (Sandoval)	20,31	2,28	27	21,30	0,000000
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	GL	t	p-valor
Porcentagem de vazios (Batezini)	26,03	2,34			
Porcentagem de vazios (Sandoval)	19,46	1,72	13	23,33	0,000000

APÊNDICE 7- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE- ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	220,11	73,37	24,71	0,000000
Erro	24	71,27	2,97		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,000505	0,000161	0,000161
P5.n-2		0,000505		0,028198	0,155079
P10.n-1		0,000161	0,028198		0,838467
P10.n-2		0,000161	0,155079	0,838467	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	1	23,05	23,05	6,80	0,022864
Erro	12	40,65	30,39		

APÊNDICE 8 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 21 DIAS – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	59,81	19,94	20,80	0,000048
Erro	24	11,50	0,96		
Teste de Tukey					
Procedimento de compactação		P5.n-1	P5.n-2	P10.n-1	P10.n-2
P5.n-1			0,000958	0,019767	0,000218
P5.n-2		0,000958		0,280759	0,174040
P10.n-1		0,019767	0,280759		0,006948
P10.n-2		0,000218	0,174040	0,006948	
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
Teste de Kruskal-Wallis					
p-valor		MC20.n-1		MC20.n-2	
MC20.n-1				0,219470	
MC20.n-2		0,219470			

APÊNDICE 9 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 21 DIAS – ETAPA EXPLORATÓRIA.

Análise estatística para método de compactação: PROCTOR					
ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	3	0,88	0,29	1,68	0,246723
Erro	8	1,40	0,17		
Análise estatística para método de compactação: MESA DE CONSISTÊNCIA					
Teste de Kruskal-Wallis					
p-valor	MC20.n-1		MC20.n-2		
MC20.n-1			0,067890		
MC20.n-2	0,067890				

APÊNDICE 10 – REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO MOLDADO EM VOLUME.

Equação: $Me_{(n)} = Me_{inf} + (Me_{sup} - Me_{inf}) * (1 - e^{-kn})$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1456,490	-	-	-	0,957
	Massa específica superior	Me _{sup}	1927,001	21,808	1875,433	1978,569	
	Coeficiente	k	0,118	0,021	0,069	0,168	
B1-D	Massa específica inferior	Me _{inf}	1474,410	-	-	-	0,927
	Massa específica superior	Me _{sup}	2160,487	64,449	2008,088	2312,885	
	Coeficiente	k	0,074	0,019	0,030	0,119	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1482,690	-	-	-	0,949
	Massa específica superior	Me _{sup}	1962,604	22,015	1910,547	2014,662	
	Coeficiente	k	0,132	0,025	0,074	0,191	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1457,060	-	-	-	0,964
	Massa específica superior	Me _{sup}	2080,242	26,568	2017,418	2143,065	
	Coeficiente	k	0,116	0,019	0,073	0,160	

APÊNDICE 11- REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO MOLDADO EM MASSA.

Equação: $Me_{(n)} = Me_{inf} + (Me_{sup} - Me_{inf}) * (1 - e^{-kn})$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1599,70	-	-	-	0,889
	Massa específica superior	Me _{sup}	2084,250	89,594	1881,573	2286,927	
	Coeficiente	k	0,036	0,013	0,007	0,066	
B1-D	Massa específica inferior	Me _{inf}	1591,80	-	-	-	0,965
	Massa específica superior	Me _{sup}	2039,640	20,888	1992,389	2086,891	
	Coeficiente	k	0,070	0,010	0,048	0,092	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1587,28	-	-	-	0,979
	Massa específica superior	Me _{sup}	2088,789	21,958	2039,118	2138,461	
	Coeficiente	k	0,059	0,007	0,044	0,075	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1555,29	-	-	-	0,983
	Massa específica superior	Me _{sup}	2069,562	14,550	2036,646	2102,477	
	Coeficiente	k	0,079	0,007	0,063	0,096	

APÊNDICE 12- VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO COM PREENCHIMENTO DO MOLDE CILINDRICO EM MASSA.

Número de golpes (N)	B1-U		B1-D		B0-U		B0-D	
	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)
0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
5	2042,04	0,19	1963,50	0,19	1963,50	0,19	1963,50	0,19
10	1924,23	0,40	1884,96	0,40	1884,96	0,40	1845,69	0,41
15	1845,69	0,62	1806,42	0,63	1806,42	0,63	1806,42	0,63
20	1845,69	0,83	1806,42	0,84	1767,15	0,86	1727,88	0,88
25	1767,15	1,08	1727,88	1,10	1767,15	1,08	1727,88	1,10
30	1806,42	1,27	1727,88	1,32	1727,88	1,32	1688,61	1,35
35	1727,88	1,54	1727,88	1,54	1727,88	1,54	1688,61	1,58
40	1727,88	1,77	1649,34	1,85	1649,34	1,85	1649,34	1,85
45	1727,88	1,99	1649,34	2,08	1649,34	2,08	1649,34	2,08
50	1727,88	2,21	1649,34	2,31	1649,34	2,31	1649,34	2,31

APÊNDICE 13- REGRESSÃO NÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES DISTRIBUÍDOS NA CHAPA METÁLICA.

Equação: $Me_{(n)} = Me_{inf} + (Me_{sup} - Me_{inf}) * (1 - e^{-kn})$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1673,125	-	-	-	0,919
	Massa específica superior	Me _{sup}	2191,366	102,579	1959,317	2423,415	
	Coeficiente	k	0,038	0,013	0,008	0,068	
B1-D	Massa específica inferior	Me _{inf}	1782,775	-	-	-	0,991
	Massa específica superior	Me _{sup}	2662,044	189,038	2234,410	3089,678	
	Coeficiente	k	0,016	0,004	0,006	0,026	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1787,525	-	-	-	0,936
	Massa específica superior	Me _{sup}	2181,626	90,155	1977,680	2385,571	
	Coeficiente	k	0,032	0,012	0,005	0,058	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1727,750	-	-	-	0,988
	Massa específica superior	Me _{sup}	2261,712	29,358	2195,300	2328,124	
	Coeficiente	k	0,050	0,006	0,037	0,062	

APÊNDICE 14- VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES DISTRIBUÍDOS NA CHAPA METÁLICA.

Número de golpes (N)	B1-U		B1-D		B0-U		B0-D	
	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)
0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
4	750,00	0,41	800,00	0,38	750,00	0,41	700,00	0,44
8	750,00	0,81	700,00	0,87	700,00	0,87	600,00	1,02
12	700,00	1,31	600,00	1,53	650,00	1,41	550,00	1,66
16	700,00	1,74	600,00	2,03	600,00	2,03	550,00	2,22
20	650,00	2,35	550,00	2,77	600,00	2,54	550,00	2,77
24	650,00	2,82	500,00	3,66	550,00	3,33	500,00	3,66
28	650,00	3,28	500,00	4,27	500,00	4,27	500,00	4,27
32	600,00	4,07	450,00	5,42	500,00	4,88	450,00	5,42
36	600,00	4,58	450,00	6,10	500,00	5,49	450,00	6,10
40	600,00	5,08	450,00	6,78	500,00	6,10	400,00	7,63

APÊNDICE 15- REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO CALCULADAS EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES CONCENTRADOS NA CHAPA METÁLICA.

Equação: $Me_{(n)} = Me_{inf} + \text{Alpha} * n$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1839,213	7,026	1822,599	1855,827	0,963
	Coeficiente	Alpha	10,889	0,808	8,978	12,800	
B1-D	Massa específica inferior	Me _{inf}	1847,634	8,195	1828,256	1867,012	0,985
	Coeficiente	Alpha	20,018	0,943	17,789	22,247	
B0-U	Massa específica inferior	Me _{inf}	1834,554	3,978	1825,147	1843,960	0,993
	Coeficiente	Alpha	14,506	0,458	13,424	15,588	
B0-D	Massa específica inferior	Me _{inf}	1881,648	4,343	1871,378	1891,919	0,992
	Coeficiente	Alpha	14,873	0,500	13,691	16,054	

APÊNDICE 16- VOLUME DE CONCRETO E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO CALCULADA DURANTE O PROCEDIMENTO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM APLICAÇÃO DOS GOLPES CONCENTRADO NA CHAPA METÁLICA.

Número de golpes (N)	B1-U		B1-D		B0-U		B0-D	
	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)	Volume final do concreto compactado V (cm ³)	E (J/cm ³)
0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
1	3200,00	0,02	3200,00	0,02	3200,00	0,02	3200,00	0,02
3	3000,00	0,08	2800,00	0,08	3200,00	0,07	3000,00	0,08
5	2800,00	0,14	2600,00	0,15	3000,00	0,13	2800,00	0,14
7	2600,00	0,21	2600,00	0,21	2800,00	0,19	2600,00	0,21
9	2600,00	0,26	2600,00	0,26	2600,00	0,26	2400,00	0,29
11	2400,00	0,35	2400,00	0,35	2600,00	0,32	2200,00	0,38
13	2400,00	0,41	2200,00	0,45	2600,00	0,38	2000,00	0,50
15	2400,00	0,48	2000,00	0,57	2400,00	0,48	2000,00	0,57

APÊNDICE 17- MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO FRESCO DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS.

Corpos de prova cilíndricos: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura											
Corpo de prova	Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
1	Massa específica no estado fresco (kg/m³)	1872,55	1959,13	1957,43	2097,49	2113,20	1867,78	1942,60	1969,94	2098,05	2117,80
2		1875,04	1950,28	1964,83	2071,90	2136,00	1851,17	1912,47	1979,28	2099,23	2099,48
3		1868,03	1969,96	1993,96	2075,19	2104,26	1880,21	1948,84	1958,73	2073,58	2114,51
4		1889,68	1952,13	2012,53	2076,93	2103,95	1887,12	1910,34	1968,31	2086,93	2110,66
5		1894,77	1936,34	1968,06	2096,62	2141,59	1852,62	1920,11	1984,92	2099,60	2102,65
6		1892,54	1954,49	1988,30	2089,91	2123,58	1852,44	1938,72	1984,13	2095,26	2104,32
7		1872,11	1965,95	2007,62	2090,41	2119,66	1852,50	1910,53	1990,74	2084,76	2099,98
8		1881,08	1959,77	2002,96	2077,86	2100,16	1863,17	1928,47	1956,24	2077,99	2137,80
9		1871,73	1947,10	1976,32	2089,85	2110,97	1852,14	1931,44	1992,56	2077,06	2141,53
10		1869,94	1971,48	1981,47	2083,02	2107,24	1857,96	1930,53	1962,79	2086,44	2135,13
11		1887,26	1952,51	2010,41	2098,92	2104,26	1851,47	1906,28	1979,95	2062,34	2129,79
12		1862,75	1965,18	1980,23	2098,73	2109,85	1848,02	1963,88	1975,10	2095,81	2089,17
13		1891,27	1967,73	1965,26	2075,57	2166,74	1847,05	1964,97	1990,38	2100,04	2105,50
14		1891,84	1937,81	1959,92	2096,81	2148,23	1839,16	1925,20	1971,10	2070,04	2087,18
Média (kg/m³)		1880,04	1956,42	1983,52	2087,09	2120,69	1857,34	1931,03	1976,01	2086,22	2112,54
Desvio Padrão (kg/m³)		10,89	11,22	19,38	10,02	20,10	13,14	19,03	11,94	12,40	17,66
Coeficiente de Variação (%)		0,58	0,57	0,98	0,48	0,95	0,71	0,99	0,60	0,59	0,84
Corpos de prova prismáticos: 100 mm de altura, 100 mm de largura e 400 mm de comprimento											
Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
	Nº de golpes aplicados com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes	0 golpe	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
1	Massa específica no estado fresco (kg/m³)	1914,45	1935,13	1996,50	2081,23	2133,10	1885,00	1924,20	1935,23	2078,23	2107,65
2		1915,83	1934,10	1996,45	2083,28	2134,35	1886,20	1913,13	1941,60	2079,33	2110,55
3		1917,48	1931,28	1999,48	2072,93	2132,33	1887,10	1921,90	1936,05	2078,15	2104,43
4		1907,18	1940,20	1999,93	2078,93	2131,80	1887,40	1917,75	2100,04	2067,18	2092,88
Média (kg/m³)		1913,73	1935,18	1998,09	2079,09	2132,89	1886,43	1919,24	1938,07	2075,72	2103,88
Desvio Padrão (kg/m³)		4,54	3,72	1,87	4,48	1,11	1,08	4,87	2,97	5,72	7,75
Coeficiente de Variação (%)		0,24	0,19	0,09	0,22	0,05	0,06	0,25	0,15	0,28	0,37

continua

Corpos de prova cilíndricos: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura											
Corpo de prova	Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
1	Massa específica no estado fresco (kg/m³)	1981,29	2026,04	2120,33	2149,29	2191,42	1941,56	2023,81	2094,80	2128,73	2178,64
2		1962,76	2044,89	2103,90	2166,86	2206,01	1938,38	2013,82	2091,74	2127,52	2162,22
3		1977,15	2047,75	2091,30	2170,17	2190,10	1950,79	2015,16	2082,32	2117,78	2154,07
4		1975,49	2043,68	2116,00	2155,09	2191,63	1959,20	2013,06	2099,00	2126,88	2160,62
5		1987,72	2031,20	2121,03	2157,12	2215,31	1940,10	2015,54	2093,92	2121,47	2154,51
6		1948,82	2048,90	2127,33	2157,63	2212,38	1961,81	2024,96	2081,94	2127,65	2153,37
7		1982,82	2033,30	2128,09	2162,92	2199,14	1947,36	2022,73	2100,05	2132,42	2164,19
8		1987,46	2055,84	2114,47	2155,66	2188,64	1958,88	2015,28	2094,73	2132,17	2168,77
9		1949,20	2028,40	2129,75	2146,24	2206,52	1966,26	2023,37	2095,31	2116,95	2159,67
10		1985,81	2058,70	2120,26	2152,48	2218,81	1965,37	2024,39	2094,80	2129,81	2172,21
11		1957,22	2050,23	2107,66	2145,98	2214,61	1969,06	2029,73	2090,98	2126,25	2176,35
12		1988,80	2055,90	2125,61	2156,10	2215,63	1960,79	2022,41	2086,78	2119,37	2156,68
13		1986,89	2032,60	2130,96	2149,80	2200,79	1964,61	2027,89	2082,83	2110,14	2174,95
14		1987,97	2041,77	2099,38	2156,23	2216,14	1960,79	2029,93	2085,76	2109,12	2179,15
Média (kg/m³)		1975,67	2042,80	2116,86	2155,83	2204,80	1956,07	2021,58	2091,07	2123,30	2165,38
Desvio Padrão (kg/m³)		14,81	10,87	12,20	7,14	11,05	10,41	5,92	6,11	7,62	9,48
Coeficiente de Variação (%)		0,75	0,53	0,58	0,33	0,50	0,53	0,29	0,29	0,36	0,44
Corpos de prova prismáticos: 100 mm de altura, 100 mm de largura e 400 mm de comprimento											
Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
	Nº de golpes aplicados com Proctor 2,5 kg	0 golpes	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes	0 golpes	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
1	Massa específica no estado fresco (kg/m³)	1993,63	2039,03	2122,83	2149,10	2181,40	1986,68	2025,60	2072,13	2124,75	2168,50
2		1995,28	2041,25	2122,48	2143,55	2194,18	1985,65	2024,28	2069,75	2110,15	2158,50
3		1991,68	2040,15	2099,23	2143,98	2182,80	1986,63	2024,70	2063,55	2103,13	2165,45
4		1991,88	2038,43	2110,90	2128,03	2188,38	1987,05	2016,60	2061,13	2111,03	2168,28
Média (kg/m³)		1993,11	2039,71	2113,86	2141,16	2186,69	1986,50	2022,79	2066,64	2112,26	2165,18
Desvio Padrão (kg/m³)		1,69	1,25	11,22	9,11	5,83	0,60	4,17	5,15	9,04	4,67
Coeficiente de Variação (%)		0,08	0,06	0,53	0,43	0,27	0,03	0,21	0,25	0,43	0,22

APÊNDICE 18- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS MASSAS ESPECÍFICAS - ETAPA FINAL

Corpos de prova cilíndricos:

Teste de Kruskal-Wallis	X ²	GL	p-valor
		280	19

p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes

Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B0-D.10G	B0-D.20G
B1-D.40G	0,000759					
B1-D.50G	0,000000	0,000144	0,014344		0,006199	
B1-U.40G	0,000648					
B1-U.50G	0,000001	0,000811			0,026773	
B0-D.20G	0,043022					
B0-D.30G	0,000000	0,000283	0,024823		0,010998	
B0-D.40G	0,000000	0,000000	0,000056		0,000020	0,034795
B0-D.50G	0,000000	0,000000	0,000000	0,047573	0,000000	0,000858
B0-U.30G	0,000374					
B0-U.40G	0,000000	0,000058	0,006794		0,002841	
B0-U.50G	0,000000	0,000000	0,000013		0,000004	0,011670
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G		B0-U.10G	B0-U.20G
B1-D.40G	0,000115	0,015357				
B1-D.50G	0,000000	0,000004	0,007443		0,000131	
B1-U.40G	0,000097	0,013394				
B1-U.50G	0,000000	0,000030	0,031701		0,000742	
B0-D.20G	0,009102					
B0-D.30G	0,000000	0,000090	0,013134		0,000258	
B0-D.40G	0,000000	0,000000	0,000025		0,000000	0,005654
B0-D.50G	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000	0,000098
B0-U.30G	0,000054	0,008316				
B0-U.40G	0,000000	0,000002	0,003436		0,000052	
B0-U.50G	0,000000	0,000000	0,000006		0,000000	0,001698

Corpos de prova prismáticos:

Teste de Kruskal-Wallis	X ²	GL	p-valor
		74	19

p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes

Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-U.10G	B1-U.20G
B1-D.50G	0,046683		0,014495	
B0-D.40G	0,028806		0,008650	
B0-D.50G	0,002755	0,021151	0,000711	0,005442
B0-U.50G	0,008101		0,002237	0,015445

APÊNDICE 19 – REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO

Equação: $E = \text{Alpha} * n$

CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Coeficiente	Alpha	428,126	3,196	419,254	436,998	R ² =0,999
B1-D	Coeficiente	Alpha	441,486	6,288	424,028	458,944	R ² =0,996
B0-U	Coeficiente	Alpha	438,633	6,691	420,056	457,211	R ² =0,995
B0-D	Coeficiente	Alpha	437,624	3,662	427,457	447,792	R ² =0,999
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Coeficiente	Alpha	252,932	2,296	246,557	259,307	R ² =0,999
B1-D	Coeficiente	Alpha	264,234	5,130	249,990	278,478	R ² =0,996
B0-U	Coeficiente	Alpha	309,956	8,813	285,486	334,426	R ² =0,992
B0-D	Coeficiente	Alpha	310,884	10,111	282,811	338,957	R ² =0,990

APÊNDICE 20- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO - ETAPA FINAL

Corpos de prova cilíndricos:

Teste de Kruskal-Wallis	X ²	GL	p-valor
		280	19

p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes

Energia de Compactação (J/m ³)	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G
B1-D.30G	0,019184			0,019184		
B1-D.40G	0,000001	0,001442		0,000001	0,004770	
B1-D.50G	0,000000	0,000000	0,019184	0,000000	0,000000	0,000297
B1-U.40G	0,000092			0,000092		
B1-U.50G	0,000000	0,000046		0,000000	0,000182	0,048009
B0-D.30G	0,019184			0,019184		
B0-D.40G	0,000001	0,001442		0,000001	0,004770	
B0-D.50G	0,000000	0,000004		0,000000	0,000002	0,007294
B0-U.30G	0,019184			0,019184		
B0-U.40G	0,000092			0,000092		
B0-U.50G	0,000000	0,000000	0,019184	0,000000	0,000016	0,000297
Energia de Compactação (J/m ³)	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-U.30G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-D.30G
B1-D.30G	0,019184			0,019184		
B1-D.40G	0,000001			0,000001	0,002624	
B1-D.50G	0,000000	0,000027	0,019184	0,000000	0,000000	0,019184
B1-U.40G	0,000092			0,000092		
B1-U.50G	0,000000	0,007294		0,000000	0,000092	
B0-D.30G	0,019184			0,019184		
B0-D.40G	0,000001			0,000001	0,002624	
B0-D.50G	0,000000	0,000907		0,000000	0,000080	
B0-U.30G	0,019184			0,019184		
B0-U.40G	0,000092			0,000092		
B0-U.50G	0,000000	0,000027	0,019184	0,000000	0,000000	0,019184

Corpos de prova prismáticos:

Teste de Kruskal-Wallis	X ²	GL	p-valor
		80	19

p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes

Energia de compactação (J/m ³)	B1-D.10G	B1-U.10G	B0-D.10G	B0-U.10G
B0-D.40G	0,049539	0,049539	0,049539	0,049539
B0-U.40G	0,049539	0,049539	0,049539	0,049539
B0-D.50G	0,006646	0,006646	0,006646	0,006646
B0-U.50G	0,006646	0,006646	0,006646	0,006646

APÊNDICE 21- PORCENTAGEM DE VAZIOS (POROSIDADE ABERTA) DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS.

Corpos de prova cilíndricos: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura											
Corpo de prova	Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
1	Porcentagem de vazios (%)	26,29	23,59	21,09	18,61	15,82	26,25	24,98	23,37	18,42	17,50
2		26,91	22,06	22,02	17,51	14,89	26,72	24,11	20,65	18,82	17,07
3		24,49	23,85	20,81	18,61	16,53	25,50	25,87	23,09	20,14	17,54
4		21,33	23,74	20,10	18,09	17,67	24,73	25,43	22,52	16,42	18,21
5		24,10	23,16	23,99	17,43	16,56	27,95	23,10	22,44	15,84	17,72
6		23,58	24,32	21,39	17,57	18,36	25,32	25,69	21,74	17,78	18,13
7		21,31	27,24	21,17	17,06	17,38	27,90	25,61	21,02	19,31	18,61
8		26,23	22,73	20,75	16,09	17,67	27,39	23,13	22,03	18,49	17,89
9		23,84	22,86	22,35	18,33	13,92	26,79	22,21	21,76	18,97	18,31
10		22,11	22,05	22,56	18,27	18,76	26,90	24,19	23,77	16,15	14,90
11		23,53	23,46	18,39	15,55	16,52	26,98	25,86	24,31	19,43	17,27
12		23,03	21,71	22,86	17,00	14,55	28,41	23,00	21,38	19,06	19,15
13		25,01	20,24	23,15	16,62	15,93	27,90	21,53	21,24	18,83	17,15
14		26,28	25,86	21,86	17,56	12,97	26,30	23,67	22,51	18,88	17,31
Média (%)		24,15	23,35	21,61	17,45	16,25	26,79	24,17	22,27	18,32	17,63
Desvio Padrão (%)		1,84	1,74	1,41	0,92	1,70	1,09	1,44	1,08	1,30	0,99
Coeficiente de Variação (%)		7,63	7,44	6,52	5,29	10,46	4,07	5,96	4,83	7,12	5,60
Corpos de prova prismáticos: 100 mm de altura, 100 mm de largura e 400 mm de comprimento											
Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
	Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes	0 golpe	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
1	Porcentagem de vazios (%)	34,16	32,63	32,05	28,80	27,90	37,95	37,36	36,10	32,05	32,09
2		33,24	33,47	33,72	28,06	27,13	38,58	37,98	35,59	31,33	29,82
3		32,39	33,91	31,45	28,96	28,24	39,21	37,59	36,05	36,28	33,47
4		33,34	31,65	31,62	28,88	28,79	39,23	37,79	35,81	36,80	33,64
Média (%)		33,28	32,91	32,21	28,67	28,02	38,74	37,68	35,89	34,11	32,25
Desvio Padrão (%)		0,72	1,00	1,04	0,42	0,69	0,61	0,27	0,24	2,83	1,77
Coeficiente de Variação (%)		2,18	3,02	3,22	1,45	2,47	1,57	0,71	0,66	8,28	5,48

Continua

Corpos de prova cilíndricos: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura											
Corpo de prova	Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
1	Porcentagem de vazios (%)	23,15	19,81	17,89	17,53	14,75	26,78	23,70	18,82	18,48	15,62
2		22,41	20,23	17,37	17,39	14,22	24,34	23,42	17,04	18,66	15,65
3		23,34	21,01	17,95	17,46	14,05	25,79	24,02	21,42	19,85	13,88
4		25,19	21,70	18,18	18,28	13,47	23,49	21,35	17,35	16,64	16,95
5		23,08	21,88	16,78	16,03	13,33	26,73	22,64	20,09	18,69	16,74
6		22,63	20,09	16,76	17,40	13,92	24,82	22,87	21,21	15,84	17,59
7		23,24	21,81	18,38	14,19	14,69	25,01	22,68	20,18	18,16	17,15
8		22,06	21,31	18,51	17,61	13,24	25,80	22,61	20,89	18,39	16,37
9		21,18	19,47	17,28	17,34	12,95	24,40	22,58	17,82	19,38	15,92
10		23,47	20,68	17,97	17,78	11,84	24,91	22,84	19,96	18,34	14,09
11		22,25	19,81	17,07	17,53	15,31	23,39	22,73	19,97	18,51	15,04
12		22,92	20,87	18,22	18,16	11,66	24,55	21,37	19,13	18,10	12,76
13		24,40	22,80	17,48	16,76	12,98	25,31	21,46	20,26	15,85	15,36
14		23,32	20,05	16,33	17,13	13,06	24,98	22,13	20,46	19,88	13,85
Média (%)		23,05	20,82	17,58	17,18	13,53	25,02	22,60	19,61	18,20	15,50
Desvio Padrão (%)		0,98	0,98	0,68	1,02	1,04	1,02	0,81	1,39	1,28	1,43
Coeficiente de Variação (%)		4,25	4,70	3,84	5,95	7,72	4,06	3,61	7,10	7,01	9,26
Corpos de prova prismáticos: 100 mm de altura, 100 mm de largura e 400 mm de comprimento											
Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
	Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes	0 golpes	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
1	Porcentagem de vazios (%)	33,10	32,64	29,35	27,48	27,40	33,89	33,45	32,32	28,50	29,69
2		32,93	30,12	30,58	27,69	24,39	35,19	34,13	33,36	29,26	30,50
3		33,10	30,95	31,89	27,51	27,21	35,07	33,73	33,87	30,55	29,62
4		33,16	32,99	31,50	28,15	26,24	33,36	34,36	35,23	28,80	26,25
Média (%)		33,07	31,68	30,83	27,71	26,31	34,38	33,92	33,69	29,28	29,02
Desvio Padrão (%)		0,09	1,18	0,98	0,27	1,19	0,78	0,35	1,05	0,78	1,63
Coeficiente de Variação (%)		0,26	3,74	3,18	0,96	4,52	2,26	1,03	3,12	2,67	5,63

APÊNDICE 22 – REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE PORCENTAGENS DE VAZIOS

Equação: $A_{aberta}(n) = A_{abertainf} + \text{Alpha} \cdot n$

PARÂMETROS VERIFICADOS NOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE DIMENSÕES 100 X 200 mm

Agregado graúdo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	29,087	0,815	26,493	31,681	0,970
	Coefficiente	Alpha	-0,242	0,025	-0,320	-0,163	
B1-D	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	27,072	1,037	23,771	30,373	0,941
	Coefficiente	Alpha	-0,217	0,031	-0,317	-0,117	
B0-U	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	27,218	0,422	25,874	28,562	0,991
	Coefficiente	Alpha	-0,234	0,013	-0,275	-0,194	
B0-D	Porcentagem de vazios	A_{aberta}	25,236	0,838	22,570	27,902	0,964
	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	-0,227	0,025	-0,307	-0,146	

PARÂMETROS VERIFICADOS NOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DE DIMENSÕES 100 X 100 X 400 mm

Agregado graúdo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	38,421	0,290	37,498	39,345	0,980
	Coefficiente	Alpha	-0,672	0,055	-0,846	-0,497	
B1-D	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	33,873	0,875	31,088	36,658	0,843
	Coefficiente	Alpha	-0,549	0,137	-0,985	-0,113	
B0-U	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	34,962	0,981	31,842	38,083	0,820
	Coefficiente	Alpha	-0,346	0,094	-0,644	-0,048	
B0-D	Porcentagem de vazios	A_{aberta}	32,945	0,328	31,901	33,990	0,979
	Porcentagem de vazios inferior	$A_{abertainf}$	-0,388	0,032	-0,491	-0,285	

APÊNDICE 23- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A PORCENTAGEM DE VAZIOS - ETAPA FINAL

Corpos de prova cilíndricos:

ANOVA FATORIAL					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Tamanho	1	127,20	127,20	83,704	1,82E-15
Granulometria	1	88,10	88,10	57,975	6,72E-12
Golpes	4	1545,60	386,40	254,347	2E-16
Tamanho*Granulometria	1	0,30	0,30	0,177	0,675
Tamanho*Golpes	4	49,30	12,30	8,118	7,92E-06
Granulometria*Golpes	4	8,30	2,10	1,362	0,251
Tamanho*Granulometria*Golpes	4	7,40	1,80	1,213	0,309
Erro	120	182,30	1,50		
Teste de Tukey ^a					
Tamanho*Golpes/ Tamanho	10	20	30	40	50
B1	a	a	a	a	a
B0	b	b	b	a	b
Golpes	10	20	30	40	50
B1	a	b	b	c	c
B0	a	b	c	c	d
Granulometria	U	D			
	a	b			

^a Letras iguais são considerados concretos com porcentagem de vazios estatisticamente iguais

Corpos de prova prismáticos:

Teste de Kruskal-Wallis	X ²	GL	p-valor
		56	19
p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes			
Procedimento de compactação	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G
B1-D.40G	0,030622		
B0-D.40G	0,004758	0,011963	
B1-D.50G	0,007101	0,017527	
B0-D.50G	0,001023	0,002755	0,014495

APÊNDICE 24- POROSIDADE ABERTA, FECHADA E TOTAL DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.

Corpo de prova	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)
	B1-D-10G			B1-U-10G		
8	26,23	37,83	11,60	27,39	35,78	8,39
9	23,84	35,53	11,69	26,79	36,90	10,11
10	22,11	39,99	17,88	26,90	36,35	9,45
11	23,53	35,92	12,39	26,98	36,55	9,57
12	23,03	35,03	12,00	28,41	38,80	10,39
13	25,01	36,53	11,52	27,90	36,43	8,53
14	26,28	39,57	13,29	26,30	35,41	9,11
Média (%)	24,29	37,20	12,91	27,24	36,60	9,37
Desvio Padrão (%)	1,60	1,97	2,28	0,72	1,09	0,75
Coefficiente de Variação (%)	6,58	5,31	17,63	2,64	2,98	8,01
Corpo de prova	B1-D-20G			B1-U-20G		
8	22,73	33,73	11,00	23,13	32,97	9,84
9	22,86	31,81	8,95	22,21	31,99	9,78
10	22,05	30,35	8,30	24,19	36,89	12,70
11	23,46	34,53	11,06	25,86	35,58	9,72
12	21,71	30,93	9,22	23,00	33,26	10,26
13	20,24	30,72	10,48	21,53	30,05	8,51
14	25,86	35,29	9,43	23,67	33,49	9,82
Média (kg/m ³)	22,70	32,48	9,78	23,37	33,46	10,09
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,73	2,00	1,08	1,41	2,25	1,27
Coefficiente de Variação (%)	7,64	6,17	11,02	6,01	6,72	12,62
Corpo de prova	B1-D-30G			B1-U-30G		
8	20,75	30,76	10,00	22,03	31,51	9,48
9	22,35	32,14	9,79	21,76	30,67	8,90
10	22,56	31,71	9,16	23,77	33,23	9,46
11	18,39	28,68	10,29	24,31	33,37	9,06
12	22,86	31,86	9,00	21,38	30,27	8,89
13	23,15	33,03	9,88	21,24	30,43	9,19
14	21,86	31,43	9,58	22,51	31,43	8,92
Média (kg/m ³)	21,70	31,37	9,67	22,43	31,56	9,13
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,66	1,37	0,46	1,19	1,28	0,26
Coefficiente de Variação (%)	7,64	4,37	4,76	5,29	4,05	2,80
Corpo de prova	B1-D-40G			B1-U-40G		
8	16,09	27,26	11,17	18,49	30,65	12,16
9	18,33	28,52	10,18	18,97	30,56	11,59
10	18,27	28,82	10,55	16,15	27,65	11,50
11	15,55	25,41	9,86	19,43	30,82	11,39
12	17,00	26,86	9,86	19,06	30,01	10,95
13	16,62	28,48	11,86	18,83	30,48	11,65
14	17,56	27,98	10,42	18,88	30,40	11,52
Média (kg/m ³)	17,06	27,62	10,56	18,54	30,08	11,54
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,06	1,20	0,73	1,09	1,10	0,36
Coefficiente de Variação (%)	6,21	4,36	6,93	5,89	3,66	3,13
Corpo de prova	B1-D-50G			B1-U-50G		
8	17,67	28,31	10,65	17,89	29,64	11,75
9	13,92	24,18	10,26	18,31	29,83	11,52
10	18,76	29,84	11,08	14,90	26,96	12,07
11	16,52	27,54	11,02	17,27	29,42	12,16
12	14,55	25,19	10,64	19,15	30,36	11,20
13	15,93	26,47	10,54	17,15	29,43	12,28
14	12,97	23,49	10,52	17,31	30,13	12,82
Média (kg/m ³)	15,76	26,43	10,67	17,43	29,40	11,97
Desvio Padrão (kg/m ³)	2,08	2,30	0,29	1,32	1,13	0,53
Coefficiente de Variação (%)	13,19	8,69	2,70	7,59	3,83	4,44

Continua

Corpo de prova	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)	Porosidade total (%)
	B0-D-10G			B0-U-10G		
8	22,06	35,47	13,40	25,80	37,72	11,92
9	21,18	34,74	13,56	24,40	36,37	11,97
10	23,47	36,60	13,13	24,91	37,51	12,60
11	22,25	36,20	13,95	23,39	35,35	11,95
12	22,92	36,21	13,30	24,55	36,70	12,16
13	24,40	37,47	13,07	25,31	37,30	11,99
14	23,32	36,62	13,30	24,98	37,42	12,44
Média (%)	22,80	36,19	13,39	24,76	36,91	12,15
Desvio Padrão (%)	1,06	0,88	0,30	0,76	0,84	0,27
Coefficiente de Variação (%)	4,65	2,43	2,21	3,08	2,27	2,22
Corpo de prova	B0-D-20G			B0-U-20G		
8	21,31	33,44	12,13	22,61	32,91	10,30
9	19,47	32,21	12,74	22,58	31,98	9,40
10	20,68	32,82	12,14	22,84	32,84	10,00
11	19,81	31,72	11,92	22,73	34,02	11,29
12	20,87	32,86	11,99	21,37	33,22	11,84
13	22,80	34,54	11,73	21,46	32,54	11,09
14	20,05	31,97	11,93	22,13	33,53	11,40
Média (kg/m ³)	20,71	32,80	12,08	22,24	33,01	10,76
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,12	0,97	0,32	0,61	0,66	0,88
Coefficiente de Variação (%)	5,42	2,95	2,65	2,73	2,01	8,14
Corpo de prova	B0-D-30G			B0-U-30G		
8	18,51	31,26	12,75	20,89	31,74	10,85
9	17,28	29,51	12,23	17,82	28,80	10,97
10	17,97	29,87	11,90	19,96	31,66	11,70
11	17,07	29,40	12,33	19,97	31,51	11,54
12	18,22	29,19	10,97	19,13	29,86	10,74
13	17,48	29,27	11,78	20,26	32,00	11,74
14	16,33	27,58	11,25	20,46	31,30	10,84
Média (kg/m ³)	17,55	29,44	11,89	19,79	30,98	11,20
Desvio Padrão (kg/m ³)	0,74	1,08	0,62	1,02	1,19	0,44
Coefficiente de Variação (%)	4,24	3,68	5,24	5,16	3,84	3,96
Corpo de prova	B0-D-40G			B0-U-40G		
8	17,61	29,29	11,67	18,39	30,98	12,59
9	17,34	30,27	12,93	19,38	31,79	12,40
10	17,78	29,39	11,62	18,34	31,15	12,81
11	17,53	28,85	11,32	18,51	31,31	12,80
12	18,16	29,57	11,41	18,10	30,40	12,30
13	16,76	29,85	13,09	15,85	28,82	12,97
14	17,13	31,26	14,14	19,88	31,45	11,57
Média (kg/m ³)	17,47	29,78	12,31	18,35	30,84	12,49
Desvio Padrão (kg/m ³)	0,45	0,79	1,08	1,27	0,99	0,47
Coefficiente de Variação (%)	2,59	2,65	8,77	6,94	3,20	3,77
Corpo de prova	B0-D-50G			B0-U-50G		
8	13,24	25,47	12,23	16,37	28,75	12,38
9	12,95	24,97	12,02	15,92	27,91	11,99
10	11,84	21,37	9,52	14,09	26,21	12,12
11	15,31	26,94	11,63	15,04	26,53	11,48
12	11,66	20,79	9,13	12,76	24,33	11,57
13	12,98	23,53	10,55	15,36	27,65	12,29
14	13,06	23,16	10,10	13,85	26,44	12,59
Média (kg/m ³)	13,01	23,75	10,74	14,77	26,83	12,06
Desvio Padrão (kg/m ³)	1,19	2,22	1,24	1,27	1,44	0,41
Coefficiente de Variação (%)	9,16	9,33	11,51	8,58	5,35	3,41

APÊNDICE 25- COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.

Corpo de prova	Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
1	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)	12,86	8,75	8,88	7,18	4,02	10,33	10,71	14,81	6,17	5,94
2		12,22	8,79	8,38	5,12	3,96	14,44	10,33	4,89	5,72	6,25
3		11,70	13,93	7,39	5,44	2,42	10,04	10,76	9,09	5,85	4,28
4		11,83	7,81	7,87	9,76	4,85	15,93	13,57	8,44	6,59	5,44
5		10,00	10,87	12,41	3,77	1,42	12,07	8,75	7,02	4,91	5,21
6		16,05	9,72	5,65	4,38	3,75	9,23	11,78	7,68	6,66	5,77
7		11,15	14,24	7,56	3,93	5,21	15,26	14,92	9,14	8,01	8,34
Média (mm/s)		12,26	10,59	8,31	5,65	3,66	12,47	11,55	8,72	6,27	5,89
Desvio Padrão (mm/s)		1,90	2,57	2,07	2,15	1,33	2,73	2,09	3,06	0,97	1,25
Coeficiente de Variação (%)		15,46	24,28	24,97	37,98	36,28	21,92	18,09	35,05	15,43	21,27
Corpo de prova	Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
1	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)	11,34	9,26	3,93	5,91	4,35	13,03	10,42	5,51	4,57	4,21
2		10,29	6,70	6,64	5,66	4,12	9,86	12,46	5,64	5,48	4,64
3		9,73	8,56	5,30	4,56	1,22	11,24	11,03	6,28	7,92	4,02
4		12,07	10,11	4,62	5,90	1,43	12,57	7,47	5,01	4,65	7,08
5		8,26	9,42	4,84	4,82	1,59	13,02	10,73	8,49	3,98	3,04
6		8,41	10,43	5,35	5,17	2,63	10,66	12,23	9,65	5,99	4,55
7		9,71	12,40	6,16	3,33	2,45	12,09	8,23	7,29	6,59	7,46
Média (mm/s)		9,97	9,55	5,26	5,05	2,54	11,78	10,37	6,84	5,60	5,00
Desvio Padrão (mm/s)		1,41	1,75	0,92	0,92	1,27	1,23	1,89	1,72	1,36	1,64
Coeficiente de Variação (%)		14,11	18,34	17,47	18,24	49,93	10,43	18,19	25,14	24,32	32,77

APÊNDICE 26- REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE

Equação: $k(n) = k_{inf} + \text{Alpha} * n$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Coeficiente de permeabilidade inferior	k_{inf}	14,512	0,799	11,969	17,055	0,951
	Coeficiente	Alpha	-0,184	0,024	-0,261	-0,108	
B1-D	Coeficiente de permeabilidade inferior	k_{inf}	14,736	0,301	13,777	15,695	0,995
	Coeficiente	Alpha	-0,221	0,009	-0,250	-0,192	
B0-U	Coeficiente de permeabilidade inferior	k_{inf}	13,417	0,934	10,445	16,389	0,934
	Coeficiente	Alpha	-0,183	0,028	-0,273	-0,094	
B0-D	Coeficiente de permeabilidade inferior	k_{inf}	12,282	1,080	8,845	15,719	0,922
	Coeficiente	Alpha	-0,194	0,033	-0,297	-0,090	

APÊNDICE 27- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - ETAPA FINAL

ANOVA FATORIAL					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Tamanho	1	8,36	8,36	20,262	1,57E-05
Granulometria	1	8,10	8,10	19,651	2,07E-05
Golpes	4	150,61	37,65	91,304	2,00E-16
Tamanho*Granulometria	1	0,46	0,46	1,125	0,290
Tamanho*Golpes	4	1,76	0,44	1,069	0,38
Granulometria*Golpes	4	4,51	1,13	2,734	3,21E-02
Tamanho*Granulometria*Golpes	4	0,59	0,15	0,360	0,840
Erro	120	49,49	0,41		
Teste de Tukey ^a					
Tamanho*Golpes/ Tamanho	10	20	30	40	50
B1	a	a	a	a	a
B0	a	a	a	a	b
Golpes	10	20	30	40	50
B1	a	a	b	b	c
B0	a	a	b	bc	c
Tamanho	B1	B0			
	a	b			

APÊNDICE 28 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.

Corpo de prova	Procedimento de compactação	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
1	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	7,67	10,18	13,96	16,75	15,25	7,97	8,59	8,07	10,97	13,06
2		7,64	11,89	10,08	16,09	17,05	6,44	9,61	12,03	11,01	10,86
3		6,04	9,76	10,78	15,37	18,50	7,93	7,43	9,40	9,68	13,29
4		8,43	8,84	16,01	11,79	18,18	7,98	10,09	12,58	15,61	12,81
5		5,78	10,68	8,51	15,16	17,85	6,80	5,61	10,05	16,38	13,38
6		6,73	10,61	10,14	16,91	13,28	7,82	8,34	13,57	11,57	12,87
7		6,78	7,33	13,02	17,98	10,56	7,73	8,07	15,45	10,39	10,49
Média (MPa)		7,01	9,90	11,78	15,72	15,81	7,52	8,25	11,59	12,23	12,40
Desvio Padrão (MPa)		0,95	1,47	2,63	1,98	2,97	0,63	1,47	2,57	2,65	1,20
Coeficiente de Variação (%)		13,55	14,81	22,31	12,62	18,78	8,39	17,87	22,15	21,65	9,67
8	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	8,02	10,82	9,90	14,64	14,36	6,49	9,72	8,95	12,06	13,82
9		8,32	9,07	7,73	12,87	17,64	6,94	10,65	10,92	12,04	13,52
10		4,32	10,69	13,20	13,53	15,37	5,44	7,56	10,38	14,98	13,53
11		8,77	10,03	13,49	15,63	14,98	6,96	7,92	8,91	6,74	13,27
12		9,62	10,30	6,47	13,83	17,18	6,24	8,03	9,78	12,59	11,52
13		5,69	10,26	8,95	14,39	19,16	6,49	10,32	11,94	11,86	12,75
14		5,88	7,37	11,15	13,13	18,33	6,67	8,78	11,14	11,50	13,09
Média (MPa)		7,23	9,79	10,13	14,00	16,72	6,46	9,00	10,29	11,68	13,07
Desvio Padrão (MPa)		1,94	1,21	2,66	0,96	1,83	0,52	1,24	1,14	2,46	0,77
Coeficiente de Variação (%)		26,81	12,36	26,22	6,83	10,93	8,03	13,77	11,10	21,10	5,87

Continua

Corpo de prova	Procedimento de compactação	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
1	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	8,23	9,43	14,26	11,43	18,31	4,85	10,29	15,34	15,59	16,23
2		7,64	10,56	14,60	14,23	17,26	7,62	9,94	13,74	13,23	14,81
3		8,77	10,83	11,71	14,15	20,18	9,39	10,60	12,69	16,00	16,91
4		9,70	8,72	12,46	15,41	20,91	8,49	11,44	12,57	13,48	9,48
5		9,10	11,10	15,58	17,41	21,75	8,52	10,49	14,03	13,06	14,80
6		10,32	11,15	14,14	13,90	16,68	7,93	9,33	13,40	16,74	14,20
7		7,91	11,16	13,44	17,23	19,03	8,30	10,63	12,79	13,71	15,43
Média (MPa)		8,81	10,42	13,74	14,82	19,16	7,87	10,39	13,51	14,55	14,55
Desvio Padrão (MPa)		0,97	0,97	1,32	2,08	1,88	1,44	0,65	0,98	1,52	2,42
Coeficiente de Variação (%)		11,04	9,28	9,59	14,04	9,84	18,31	6,28	7,24	10,42	16,63
8	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	9,48	10,30	10,63	14,65	14,95	8,09	10,60	11,12	12,30	13,87
9		10,34	10,01	14,42	15,24	18,83	8,80	11,34	15,74	14,79	15,62
10		8,02	10,69	13,38	11,46	20,10	7,24	6,72	11,12	14,59	15,84
11		8,36	12,57	13,19	14,53	18,26	8,54	6,06	13,91	13,11	16,43
12		8,59	10,17	12,80	14,64	20,82	7,97	11,88	10,91	14,33	15,86
13		7,78	9,40	15,10	15,96	20,40	7,65	11,18	12,98	14,12	13,41
14		9,12	8,70	14,08	13,60	18,32	6,40	9,79	12,80	11,88	17,94
Média (MPa)		8,81	10,26	13,37	14,30	18,81	7,81	9,65	12,65	13,59	15,57
Desvio Padrão (MPa)		0,89	1,21	1,44	1,44	1,99	0,81	2,33	1,78	1,16	1,53
Coeficiente de Variação (%)		10,15	11,78	10,79	10,09	10,56	10,40	24,12	14,07	8,54	9,84

APÊNDICE 29 – REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Equação: $f_c(n) = f_{cinf} + \text{Alpha} \cdot n$							
Agregado gráudo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Resistência à compressão inferior	f_{cinf}	5,796	1,067	2,401	9,191	0,878
	Coeficiente	Alpha	0,149	0,032	0,047	0,252	
B1-D	Resistência à compressão inferior	f_{cinf}	5,314	0,986	2,177	8,451	0,951
	Coeficiente	Alpha	0,227	0,030	0,132	0,321	
B0-U	Resistência à compressão inferior	f_{cinf}	6,918	1,224	3,022	10,814	0,882
	Coeficiente	Alpha	0,175	0,037	0,058	0,293	
B0-D	Resistência à compressão inferior	f_{cinf}	5,860	0,910	2,965	8,755	0,965
	Coeficiente	Alpha	0,251	0,027	0,164	0,338	

APÊNDICE 30 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ETAPA FINAL

Teste de Kruskal-Wallis		X ²		GL		p-valor	
		96,57143		19		0,000000	
p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes							
Resistência à compressão (MPa)	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-U.10G	B1-U.20G	B0-D.10G	B0-U.10G	B0-U.20G
B1-D.40G	0,000665		0,000349	0,010041	0,027255	0,004303	
B1-D.50G	0,001035		0,000549	0,014823	0,039396	0,006462	
B0-D.30G	0,030305		0,017713				
B0-D.40G	0,003501		0,001919	0,043142		0,019747	
B0-D.50G	0,000004	0,01139	0,000002	0,00011	0,000372	0,000039	0,03643
B0-U.30G			0,040434				
B0-U.40G	0,007043		0,003940			0,037394	
B0-U.50G	0,007673		0,004303			0,040434	

APÊNDICE 31- RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.

Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B1-D.10G	B1-D.20G	B1-D.30G	B1-D.40G	B1-D.50G	B1-U.10G	B1-U.20G	B1-U.30G	B1-U.40G	B1-U.50G
	Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	3 golpes	5 golpes	7 golpes	11 golpes	0 golpe	1 golpe	3 golpes	7 golpes	9 golpes
1	Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	1,59	1,81	1,55	1,79	1,71	1,11	1,33	1,68	1,82	1,83
2		1,67	1,65	1,51	1,72	1,94	1,66	1,65	1,89	1,89	2,07
3		1,72	1,33	1,83	2,02	2,22	1,43	1,41	1,29	1,51	1,47
4		1,55	1,84	1,83	2,00	1,84	1,71	1,60	1,50	1,33	1,46
Média (MPa)		1,63	1,66	1,68	1,88	1,93	1,48	1,50	1,59	1,64	1,71
Desvio Padrão (MPa)		0,07	0,23	0,17	0,15	0,21	0,27	0,15	0,25	0,26	0,29
Coeficiente de Variação (%)		0,45	1,41	1,04	0,79	1,11	1,85	1,01	1,60	1,61	1,72
Corpo de prova	Procedimento de compactação correspondente	B0-D.10G	B0-D.20G	B0-D.30G	B0-D.40G	B0-D.50G	B0-U.10G	B0-U.20G	B0-U.30G	B0-U.40G	B0-U.50G
	Nº de golpes aplicado com Proctor 2,5 kg	0 golpes	2 golpes	7 golpes	13 golpes	17 golpes	0 golpes	3 golpes	9 golpes	13 golpes	17 golpes
1	Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	1,98	1,45	1,71	2,26	2,25	1,73	1,69	1,47	1,90	1,74
2		1,50	1,81	1,49	1,78	2,17	1,52	1,65	1,37	1,87	2,32
3		1,55	1,83	1,77	1,83	1,93	1,52	1,69	1,67	1,88	2,21
4		1,51	1,49	1,76	1,89	2,32	1,57	1,43	2,09	2,04	2,17
Média (MPa)		1,64	1,65	1,68	1,94	2,16	1,58	1,61	1,65	1,92	2,11
Desvio Padrão (MPa)		0,23	0,21	0,13	0,22	0,17	0,10	0,13	0,31	0,08	0,26
Coeficiente de Variação (%)		1,42	1,25	0,79	1,12	0,79	0,63	0,78	1,91	0,42	1,21

APENDICE 32 – REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Equação: $f_{ct,f}(n) = f_{ct,finf} + \text{Alpha} \cdot n$							
Agregado graúdo	Parâmetro		Estimativa	Erro	Intervalo de confiança de 95%		R ²
	Descrição	Sigla			Limite inferior	Limite superior	
B1-U	Resistência à tração na flexão inferior	$f_{ct,finf}$	1,487	0,015	1,440	1,534	0,962
	Coefficiente	Alpha	0,024	0,003	0,015	0,033	
B1-D	Resistência à compressão inferior	$f_{ct,finf}$	1,596	0,048	1,444	1,748	0,849
	Coefficiente	Alpha	0,031	0,007	0,007	0,055	
B0-U	Resistência à compressão inferior	$f_{ct,finf}$	1,516	0,074	1,279	1,752	0,862
	Coefficiente	Alpha	0,031	0,007	0,008	0,053	
B0-D	Resistência à compressão inferior	$f_{ct,finf}$	1,578	0,060	1,388	1,768	0,898
	Coefficiente	Alpha	0,030	0,006	0,011	0,049	

APENDICE 33- ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO - ETAPA FINAL

ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p-valor
Procedimento de compactação	19	2,80	0,15	3,417	0,000145
Erro	60	2,59	0,04		
p-valor para os concretos considerados estatisticamente diferentes					
Resistência à tração na flexão (MPa)	B1-U.10G	B0-U-10G	B1-U.20G	B0-U.20G	B1-U.30G
B0-D.50G	0,002564	0,025539	0,004309	0,045103	0,026781
B0-U.50G	0,008087		0,013340		