

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS E TECNOLOGIAS

CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADOS RECICLADOS
DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA

Aline Ribeiro

CAXIAS DO SUL

2014

Aline Ribeiro

**CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADOS RECICLADOS DE
RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias, orientado por Rosmary Nichele Brandalise e coorientado por Venina dos Santos.

CAXIAS DO SUL

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

R484c Ribeiro, Aline, 1986-
Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana / Aline Ribeiro. – 2014.
107 f. : il. ; 30 cm

Apresenta bibliografia.
Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologia, 2014.
Orientadora: Profa. Dra. Rosmary Nichele Brandalise ; Coorientadora: Profa. Dra. Venina dos Santos.

1. Reaproveitamento (sobras, refugos). 2. Resistência dos materiais. 3. Concreto. 4. Meio ambiente - Preservação. 5. Poluição ambiental. I. Título.

CDU 2.ed.: 628.477.5

Índice para o catálogo sistemático:

1. Reaproveitamento (sobras, refugos)	628.477.5
2. Resistência dos materiais	620.193
3. Concreto	691.32
4. Meio ambiente - Preservação	504
5. Poluição ambiental	504.054

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Roberta da Silva Freitas – CRB 10/1730

“CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE
ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA”

Aline Ribeiro

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Processos e Tecnologias, Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos e Produtos Industriais.

Caxias do Sul, 28 de Outubro de 2014.

Banca Examinadora:

Dra. Rosmary Nichele Brandalise (Orientadora)
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Venina dos Santos

Dra. Venina dos Santos (Coorientadora)
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Daniel Tregnago Pagnussat
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Dra. Maria Fernanda de Oliveira Nunes
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por escutar minhas preces e por ter orientado o meu caminho por todas as minhas conquistas, pois sem as suas bênçãos eu não poderia alcançar minhas metas. Agradeço por todas as minhas superações e por tantas barreiras consideradas indestrutíveis, que me ajudou e ajuda, a cada dia a derrubar.

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio de algumas pessoas que, após a decisão da concretização deste projeto de estudo e de vida, permaneceram ao meu lado em todos os difíceis e bons momentos que surgiram.

Agradeço a minha mãe. Mãe, companheira, confidente, fiel e amiga. As palavras sobram, não traduzem o que a senhora significa. Que eu possa sempre sentir e ter esse amor maior em todos os momentos da minha vida.

Ao meu pai, que sempre esteve na torcida. Obrigado, pai, pelas orações, pelos conselhos e olhares preocupados nas idas e vindas da minha jornada. Pai, simplesmente amor.

Aos meus irmãos amados e familiares queridos, pela torcida e incentivo. Em memória à minha amada irmã Cléia. Mana Cléia! Infelizmente, nem tudo na vida é como a gente quer que seja. Você sempre estará presente na minha vida e nos meus pensamentos.

Ao meu companheiro, amigo e noivo Diego Grandi, pela paciência e tranquilidade evidenciadas em seus gestos de carinho e nas palavras de conforto nos momentos difíceis e bons.

À minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Rosmary Nichele Brandalise, por acreditar na arte de ensinar, por aceitar o grande desafio de orientar o meu trabalho, pela mediação do meu ser e fazer, tornando possível o desenvolvimento de habilidades e competências até então desconhecidas. Obrigada pela disponibilidade que sempre manifestou e a

empatia e paciência com que recebeu as minhas ideias. Saiba que foi o estímulo que me permitiu vencer as inseguranças deste processo. Pelos e-mails trocados, reuniões, telefonemas, caronas. Pela grande amizade construída. Valeu professora!

Ao Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat, pelas inúmeras oportunidades de discussão de aspectos relevantes no meu projeto. Sempre muito prestativo e competente, devo agradecer pela orientação em inúmeras etapas, por seu apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram à execução e conclusão deste projeto e, acima de tudo, pela compreensão e confiança a mim depositada.

À minha coorientadora, Prof^a. Dra. Venina dos Santos, pelo acompanhamento e saberes compartilhados ao longo da minha pesquisa.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC).

Aos professores do PGEPROTEC, pelas importantes contribuições teóricas e práticas durante as disciplinas cursadas.

À Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e à Rio Grande Energia (RGE), pelo financiamento do Projeto, concessão da bolsa de mestrado e pelo fornecimento de toda a matéria-prima necessária para a execução deste trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Maria Fernanda de Oliveira Nunes, sempre muito prestativa, obrigada pelas sugestões e ensinamentos.

À Prof^a. M.Sc. Juliana Alves de Lima Senisse, pela sua solicitude e acolhimento nas aulas assistidas de Materiais de Construção Civil e pelos importantes ensinamentos mediados.

À Prof^a. Dr^a. Ana Maria Coulon Grisa, pelo acolhimento em sua turma de Química dos Polímeros, permitindo-me a vivência do fazer docente durante meu estágio docente.

À Prof^a. M.Sc. Mayta Fernanda Pasa e ao Laboratório de Escultura da UCS.

Ao colega e M.Sc. Fabiano da Costa Höltz, pela colaboração e confiança conferidas.

À colega e M.Sc. Carolina Casagrande Broetto. Carol! Amiga e colega, sempre muito solícita, sua atenção, troca de experiências e saberes durante meu projeto serão lembrados. Obrigada!

Ao Laboratório de Tecnologia Construtiva da UCS, aos técnicos Cleicimara Cozen Colvara, Cesar Augusto Herkert Barbosa, e ao funcionário Luís Antonio da Silva Cabral, pela caminhada conjunta, acolhimento, atendimento e contribuições na realização de análises e testes importantes do presente projeto.

Ao técnico da Maquetaria da UCS, Eliseu Antonio Basso, pelos materiais emprestados.

Ao funcionário do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UCS, Antônio Agadir de Souza.

Ao Prof. M. Sc. Rodrigo Antonio Barbieri, na realização de análises.

Às secretárias do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC), Celiane Zanchin e Deise Ediane Carvalho.

A todas as pessoas que, de alguma forma, colaboraram para que este objetivo de vida fosse realizado. Muito obrigada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1	Isoladores Elétricos de Porcelana	24
3.2	Concretos e Argamassas com Resíduos Alternativos.....	30
3.3	Concreto Permeável.....	35
3.3.1	Características do Concreto Permeável	39
3.3.2	Propriedades de Concretos Permeáveis.....	40
3.3.2.1	Permeabilidade de Água.....	40
3.3.2.2	Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos Permeáveis.....	44
3.3.2.3	Concretos Permeáveis com emprego de Resíduos Alternativos	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1	Materiais	51
4.2	Métodos	51
4.2.1	Caracterização das Matérias-Primas.....	51
4.2.2	Cominuição e Caracterização dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana	53
4.3	Incorporação dos Agregados Reciclados dos Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis - Estudo Exploratório	54

4.3.1	Preparação dos Corpos de Prova das Proporções do Estudo Exploratório	55
4.3.2	Caracterização das Proporções do Estudo Exploratório.....	56
4.4	Preparação e Análise de Propriedades das Proporções de Concretos Permeáveis – Referência, 50 e 100% em RIP	60
4.4.1	Avaliação da Massa Unitária - Proporções dos Concretos Permeáveis ...	61
4.4.2	Avaliação do Abatimento de Tronco de Cone - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	61
4.4.3	Determinação de densidade de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido - proporções dos concretos permeáveis	62
4.4.4	Determinação da Resistência à Compressão - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	63
4.4.5	Determinação da Resistência à Tração na Flexão - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	63
4.4.6	Determinação do Módulo de Elasticidade - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	64
4.4.7	Determinação do Índice de Vazios - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	65
4.4.8	Determinação do Coeficiente de Permeabilidade - Proporções dos Concretos Permeáveis.....	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Resultados da Caracterização das Matérias-Primas.....	67
5.1.1	Caracterização Granulométrica dos Agregados do Agregado Natural e dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana.....	67

5.1.2	Análise da Caracterização Física do Agregado Natural e dos Agregados Recicladados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana	72
5.2	Incorporação dos Agregados Recicladados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis - Resultado do Estudo Exploratório	74
5.2.1	Relação Água/Cimento (a/c) - Resultado do Estudo Exploratório.....	74
5.2.2	Coeficiente de permeabilidade - Resultado do Estudo Exploratório.....	78
5.2.3	Relação Cimento/Materiais Secos (1/m) - Resultado do Estudo Exploratório	79
5.3	Resultado da Incorporação dos Agregados Recicladados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis – Referência, 50 e 100% em Massa de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana.....	80
5.3.1	Avaliação da Massa Unitária - Referência, 50 e 100% de RIP	80
5.3.2	Avaliação do Abatimento de Tronco de Cone – Referência, 50 e 100% RIP	81
5.3.3	Determinação da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco e no Estado Endurecido – Referência, 50 e 100% em RIP	82
5.3.4	Determinação da Resistência à Compressão – Referência, 50 e 100% RIP.	83
5.3.5	Determinação da Resistência à Tração na Flexão – Referência, 50 e 100% em RIP	85
5.3.6	Determinação do Módulo de Elasticidade – Referência, 50 e 100% em RIP	88
5.3.7	Determinação do Índice de Vazios – Referência, 50 e 100% em RIP	89

5.3.8	Determinação do Coeficiente de Permeabilidade – Referência, 50 e 100% de RIP	92
6	CONCLUSÕES.....	95
6	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXOS	106
	ANEXO 1. Laudo Técnico Fornecido pelo Fabricante Votorantim Cimentos – Cimento CP IV – 32 da marca Votoran.....	106
	ANEXO 2.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados setoriais dos isoladores elétricos de porcelana (ABCERAM, 2012)	29
Tabela 2 - Composição química elementar por FRX em porcentagem mássica. (GOMES <i>et al.</i> , 2012)	30
Tabela 3 - Proporções dos concretos permeáveis do estudo exploratório	55
Tabela 4 - Proporções dos concretos permeáveis: referência, 50 e 100% em massa de resíduos de isoladores elétricos de porcelana	60
Tabela 5 - Distribuição granulométrica dos agregados naturais e dos agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana	68
Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos proporcionamentos no estudo exploratório dos concretos permeáveis.	70
Tabela 7 - Distribuição granulométrica dos proporcionamentos dos concretos CR, CP-50 e CP-100.	71
Tabela 8 - Resultado da caracterização dos agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana e a comparação com os parâmetros da literatura.	72
Tabela 9 - Massa unitária dos concretos permeáveis.	80
Tabela 10 - Valores da avaliação do abatimento de tronco de cone.	81
Tabela 11 - Densidades de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido	82
Tabela 12 - Resultados da análise estatística do efeito dos proporcionamentos na resistência à compressão das amostras CR, CP-50 e CP-100.	84
Tabela 13 - Resultado da análise estatística do efeito dos proporcionamentos no módulo de elasticidade das amostras CR, CP-50 e CP-100.	88
Tabela 14 - Resultados do índice de vazios dos concretos permeáveis CR, CP-50 e...	89

Tabela 15 - Resultado da análise estatística do efeito dos proporcionamentos CR, CP–50 e CP–100 e das condições de amostra saturada e seca sobre o coeficiente de permeabilidade.....	93
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de coeficiente de permeabilidade propostos por diferentes autores (fonte: o autor).	44
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Isoladores de porcelana (FERREIRA <i>et al.</i> , 2010).	25
Figura 2 - Composição dos isoladores elétricos de porcelana (MAMEDE FILHO, 1994).	25
Figura 3 - Triângulo da composição da porcelana (MAMEDE FILHO, 1994).	27
Figura 4 - Resíduos de isoladores elétricos de porcelana na Estação Avançada de Vacaria – RS.	28
Figura 5 - Aplicações do concreto permeável. (a) parques; (b) pátios residenciais, estufas de plantas; (c) estacionamentos; (d) ruas de baixo tráfego; (e) ciclovias (IBRACON, 2011).	38
Figura 6 - (a) Textura do concreto permeável e (b) do concreto convencional vista do topo (MULLIGAN, 2005).	39
Figura 7 - Mecanismo proposto para a medição do coeficiente de permeabilidade de água (NEITHALATH <i>et al.</i> , 2003).	43
Figura 8 - Fratura de uma amostra de concreto permeável predominantemente na zona de interface pasta/agregado (LIAN e ZHUGE, 2010).	45
Figura 9 - Fatores que afetam a resistência mecânica do concreto permeável.....	47
Figura 10 - Relação entre a maior (L) e a menor dimensão (b) para o cálculo de índice de forma.	53
Figura 11 - Representação esquemática do sistema de medição da permeabilidade da água em placa de concreto (Fonte: o autor).	57
Figura 13 - Sequência esquemática do ensaio Slump test.	61
Figura 14 - Resíduos de isoladores elétricos de porcelana (a) antes do processo de cominuição (b) antes do processo de cominuição com dimensões de partículas e	69

Figura 15 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório A550, (a) parte superior e (b) inferior.	74
Figura 16 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório B550, (a) parte superior e (b) inferior.	75
Figura 17 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório C440, (a) parte superior e (b) inferior.	75
Figura 18 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório D440, (a) parte superior e (b) inferior.	76
Figura 19 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório E440, (a) parte superior e (b) inferior.	76
Figura 20 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório F435, (a) parte superior e (b) inferior.	77
Figura 21 - Resultados do coeficiente de permeabilidade do estudo exploratório.....	78
Figura 22 - Resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone de cone do CR.....	82
Figura 23 - Resistência à compressão das amostras CR, CP – 50 e CP – 100 após 7 e 28 dias de idade.	84
Figura 24 - Resistência à tração na flexão do concreto permeável referência em molde prismático com 28 dias de idade (Fonte: o autor).	86
Figura 25 - Imagens da zona de fratura da amostra CR (no ensaio de tração na flexão), obtidas por (a) e (b) fotografia (Fonte: o autor).....	86
Figura 26 - Resistência à tração na flexão das amostras de concretos permeáveis moldes prismáticos aos 28 dias de idade.	87
Figura 27 - Módulo de elasticidade dos concretos CR, CP – 50, CP – 100 após 28 dias de idade.....	88

Figura 28 - Aspecto visual das placas de concretos, (a) CR vista superior, (b) CR vista da parte de baixo; (c) CP – 50 vista superior, (d) CP–50 vista da parte de baixo e (e) CP–100 vista superior, (f) CP–100 vista da parte de baixo.....	91
Figura 29 - Densidade e índice de vazios das proporções de concretos permeáveis. ...	91
Figura 30 - Coeficiente de permeabilidade das proporções de concretos na condição amostra seca e saturada.....	92

RESUMO

A geração de resíduos, em geral, pode trazer diversos problemas ao meio ambiente em decorrência de seu descarte inadequado, tornando necessária a busca por métodos alternativos para o manuseio, tratamento e disposição final dos mesmos. A Política Nacional Brasileira de Resíduos Sólidos de 2010 estabelece que os resíduos sólidos gerados em território brasileiro, de qualquer natureza, devem ser, nos processos geradores, reduzidos, tratados e reutilizados dentro do conceito de desenvolvimento sustentável. Estima-se que o Brasil produza, anualmente, 30.000 toneladas de isoladores elétricos de porcelana para abastecer sua rede elétrica, com uma geração de resíduos da ordem de 10% do total produzido. Diante deste cenário, a busca por alternativas para utilização de resíduos de isoladores elétricos de porcelana em novos produtos, tem despertado o interesse acadêmico e tecnológico. Neste estudo, resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP) foram cominuídos em dimensões compatíveis para a aplicação em concretos permeáveis e foram caracterizados por análise física (granulométrica, índice de forma, absorção de água, massa específica). A partir da caracterização do RIP, foi proposta uma matriz experimental para a avaliação de concretos permeáveis, incorporando 50 e 100% em massa de RIP em substituição aos agregados graúdos. As propriedades de resistência mecânica sob compressão, sob tração na flexão, e o módulo de elasticidade das proporções com essas incorporações foram comparadas às de um concreto referência. Os resultados de resistência mecânica sob compressão para os concretos permeáveis propostos foram inferiores ao referência 21, e 24% respectivamente para 50 e 100% em massa de RIP, sob tração na flexão os resultados foram inferiores 38 e 46,5% respectivamente para 50 e 100% em massa de RIP, o módulo de elasticidade foi inferior ao referência 6,4% respectivamente para 50% em massa de RIP e superior 3,13% respectivamente para 100% em massa de RIP. Os resultados de resistência mecânica sob compressão, sob tração na flexão e o módulo de elasticidade para os concretos permeáveis 50 e 100% em massa de RIP encontram-se dentro dos valores relatados na literatura para concretos permeáveis. Os resultados de índice de vazios dos concretos permeáveis, referência, 50% em massa de RIP e 100% em massa de RIP ficaram numa faixa de 12,5 – 18,2% e os resultados do coeficiente de permeabilidade para os concretos permeáveis referência, 50% em massa de RIP e 100% em massa de RIP ficaram numa faixa de 0,05 a 0,2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ na condição amostra seca e 0,14 a 0,15 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ na condição amostra saturada, contudo encontram-se dentro dos valores relatados na literatura para concretos permeáveis. Os resultados demonstram que é possível utilizar resíduos de isoladores elétricos de porcelana em substituição a agregados graúdos, permitindo incorporações de até 100% de RIP em concreto permeável.

Palavras-chave: Resíduo de Isolador Elétrico de Porcelana, Propriedades, Coeficiente de Permeabilidade, Concreto Permeável.

ABSTRACT

The generation of waste, in general, can bring many environment issues due to their improper disposal, making necessary to search for alternative methods for handling, treatment and final disposal of them. The Brazilian National Solid Waste Policy of 2010 defines that the solid waste generated in Brazilian territory, of any kind, should be, in their generators processes, reduced, treated and reused within the concept of sustainable development. It is estimated that Brazil produces annually 30,000 tons of electrical porcelain insulators to supply its power grid with a waste generation around 10% of the total production. In this scenario, the search for alternatives to the use of waste electrical porcelain insulators on new products has attracted academic and technological interest. In this study, waste electrical porcelain insulators (RIP) were comminuted in sizes compatible for use in permeable concrete. They were characterized by physical analysis (particle size distribution, shape index, water absorption and specific mass). Based on the characterization of RIP, an experimental matrix was proposed, to evaluate permeable concrete by incorporating 50 to 100%wt of RIP instead of coarse aggregate. The mechanical strength properties under compression, tension in bending and the modulus of elasticity of aforementioned proportions were compared to a reference concrete. The results of mechanical strength under compression for the proposed permeable concrete showed lower values than for the reference (values of 21 and 24% for 50 and 100 %wt of RIP, respectively). In tension in bending, the results were 38 and 46.5 % lower for 50 and 100%wt of RIP, respectively. The modulus of elasticity of the proportion 50%wt of RIP was 6.4% lower than the reference, while for the proportion 100%wt of RIP was 3.13% higher than the reference. The results of mechanical strength under compressive tensile, bending and the modulus of elasticity for the specific permeable concrete are within the reported values in the literature for this kind of material. The void index results for the permeable concrete and the reference were in a range from 12.5 to 18.2% and the results of the permeability coefficient were in a range of 0.05 to 0.2 cm s⁻¹ in the sample dry condition and of 0.14 to 0.15 cm s⁻¹ in the sample saturated condition, however they lie within the literature reported values for permeable concrete. The results demonstrate that it is possible to use waste electrical porcelain insulators replacing coarse aggregate, enabling the incorporation of up to 100% of RIP in permeable concrete.

Keywords: Waste Electrical Insulator Porcelain, Properties, Permeability Coefficient, Permeable Concrete.

1 INTRODUÇÃO

A geração contínua de resíduos industriais, em geral, pode trazer problemas ao ambiente, em decorrência do descarte inadequado, tornando necessária a busca por métodos alternativos para o manuseio, tratamento e disposição adequada para os mesmos. A quantidade de resíduos gerados pela população como um todo, e também a falta de locais apropriados para sua disposição, compromete áreas de preservação ambiental e de mananciais (MARTÍNEZ *et al.*, 2012).

Com a aprovação da Lei 12.305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos gerados em território brasileiro, de qualquer natureza, devem ser, nos processos geradores, reduzidos, tratados e reutilizados dentro do conceito de desenvolvimento sustentável.

A utilização de resíduos cerâmicos em outras aplicações possibilita minimizar o problema da geração de resíduos da indústria cerâmica, e ao mesmo tempo leva a uma solução sustentável para a fabricação de artefatos que necessitam do uso de fontes não renováveis, como no caso dos agregados utilizados para a produção de concreto (TORGAL e JALALI, 2010).

Dados de 2011 da Rio Grande Energia (RGE) indicam uma geração de 168 t/ano de isoladores elétricos de porcelana, que após sua vida útil foram retirados da rede de energia e nas estações avançadas (EAs) do grupo, foram separados em contêineres, comercializados ou então enterrados por serem classificados como resíduo Classe II-B-inerte, segundo NBR 10.004-04 (ABNT, 2004), baseada no *Code of Federal Regulations (CRF)-Title 40- Protection of Environmental - Part 260-265 - Hazardous Waste Management*.

A indústria cerâmica e de processos de fabricação de cimento tornaram viável o aproveitamento de resíduos cerâmicos, especialmente por meio da incorporação de resíduo na estrutura interna dos materiais como parte da sua própria matriz (NAGA *et al.*, 2002), (SÁNCHEZ-MUÑOZ *et al.*, 2002). Outras aplicações para os resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP) em artefatos cerâmicos foram propostos por Campos, (2009) e Gomes *et al.*, (2012), ambos destacando em seus estudos a necessidade da utilização de processos de cominuição por compressão, buscando dimensões de partícula compatível com aplicação em artefatos como concretos e argamassas.

O uso de resíduos de isoladores elétricos de porcelana incorporados ao concreto de cimento *Portland* em substituição aos agregados graúdos utilizados na indústria de concretos foi descrito em estudos por Senthamarai e Manoharan (2005) e por Portella *et al.*, (2006).

Ferreira *et al.*, (2010) utilizaram os isoladores elétricos de porcelana fragmentados na construção de gabiões em substituição à rocha basáltica para barreiras de contenção.

A busca por materiais para as atividades de construção sustentável é crescente. Os recursos naturais são cada vez mais consumidos devido às atividades de construção e rápida urbanização, de modo que várias estratégias estão sendo investigadas para proteger e restaurar ecossistemas naturais do mundo (DEO e NEITHALATH, 2011).

Com base em um desenvolvimento sustentável de baixo impacto, o concreto permeável é um material de pavimentação ecológica, composto por cimento, água, agregado graúdo e pouco ou nenhum agregado fino. Esta combinação confere ao produto final maior porosidade e permeabilidade do que o concreto convencional, oportunizando ao concreto permeável ser um produto de gestão muito eficaz de águas

pluviais, reduzindo o escoamento superficial dessas águas e recarga das águas subterrâneas, quando utilizado como material de pavimentação para estacionamentos, calçadas, na composição das lajes das “coberturas verdes” em edificações, como material drenante de suporte das vegetações, em pavimentos evitando a ocorrência de aquaplanagem dos veículos. A sua estrutura pouco densa armazena menor quantidade de calor, auxiliando na redução do aquecimento das áreas urbanas (PERVIOUS CONCRETE, 2013; SATA *et al.*, 2013).

A contribuição acadêmica e o diferencial desta proposta está na utilização de resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP) moídos, gerados pela Rio Grande Energia – RGE, na produção de concretos permeáveis, em substituição a matérias-primas de fontes não renováveis como agregado graúdo, com potencial uso na indústria da construção civil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Produzir e caracterizar concretos permeáveis com o emprego de agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana, em substituição aos agregados naturais.

2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral proposto neste trabalho, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Definir faixas granulométricas dos agregados compatíveis para aplicação em concreto permeável;
- Determinar características físicas dos agregados reciclados de RIP confrontando com as características físicas dos agregados naturais a serem substituídos na produção de concreto permeável;
- Determinar propriedades físicas e mecânicas dos concretos permeáveis produzidos com agregados naturais buscando comparar com dados da literatura e com os resultados dos concretos permeáveis empregando agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana;
- Avaliar a influência da incorporação de diferentes teores e faixas granulométricas (12,5; 9,5; 6,3; 4,8; 2,4 mm) de agregados reciclados de RIP em substituição parcial e total aos agregados naturais em concreto permeável;

- Desenvolver uma ferramenta de análise que possibilite o monitoramento da permeabilidade da água dos concretos com agregados reciclados de RIP, relacionando com dados da literatura.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Isoladores Elétricos de Porcelana

Os materiais cerâmicos ocupam um importante espaço entre os materiais utilizados pela engenharia. São classificados como materiais inorgânicos, não-metálicos, compostos de átomos metálicos e não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas são de caráter iônico-covalentes. Suas propriedades desejadas são obtidas por meio de tratamento térmico a elevadas temperaturas (CALLISTER, 2008).

Os materiais cerâmicos que possuem boas propriedades de isolamento elétrico são denominados materiais dielétricos. Estes materiais embora não conduzam eletricidade quando um campo elétrico é aplicado, não são propriamente inertes ao campo elétrico, devido a leve mudança no balanço das cargas elétricas quando submetidos a um campo elétrico, originando a formação de um dipolo elétrico são denominados materiais dielétricos. Exige-se, que estes materiais possuam uma grande capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica, além de elevada resistência mecânica (CHINELATTO e SOUSA, 2004; GOMES, 2012).

Estes materiais possuem aplicação na indústria eletroeletrônica e nas redes de distribuição de energia elétrica para a transmissão de energia a longas distâncias (CHINELATTO e SOUSA, 2004).

Os isoladores elétricos de porcelana (Figura 1) fazem parte do grupo de materiais cerâmicos denominados porcelanas, que são produzidas a partir da mistura de matérias-primas naturais constituídas de diversos componentes e com larga distribuição granulométrica (ABCERAM, 2012).



Figura 1 - Isoladores de porcelana (FERREIRA *et al.*, 2010).

Os isoladores elétricos de porcelana são constituídos (Figura 2) basicamente de 30% de caulim associados à argila; 30% de feldspato e 40% de quartzo (MAMEDE FILHO, 1994).



Figura 2 - Composição dos isoladores elétricos de porcelana (MAMEDE FILHO, 1994).

Nestas cerâmicas, as ligações iônicas restringem a mobilidade dos elétrons e as tornam bons isolantes elétricos. A substituição total ou parcial do quartzo por alumina tem sido utilizada para promover aumento da resistência mecânica aos isoladores elétricos. As porcelanas formadas por alumina, feldspato e caulim são chamadas de porcelanas aluminosas e são utilizadas na fabricação de isoladores elétricos de alta tensão, por possuírem propriedades dielétricas adequadas e propriedades mecânicas superiores às das porcelanas que utilizam o quartzo (CHINELATTO e SOUZA, 2004).

Os isoladores elétricos de porcelana são classificados como cerâmica branca, pois possuem um corpo de massa recoberto por uma camada vítrea de esmalte. A elevada área superficial da argila combinada com a morfologia de suas partículas, placas finas, fornece plasticidade à massa. A argila não deve apresentar altas concentrações de ferro para não comprometer as funções isoladoras do produto. As concentrações de feldspato são responsáveis pela geração da fase vítrea e do elevado ponto de fusão, sendo manufacturados a frio em sua forma plástica e posteriormente submetidos a tratamento térmico em temperaturas de até 2000°C e o quartzo, responsável pela formação do esqueleto da peça de porcelana, participa na formação da microestrutura de várias formas. Por ser a fração mais grosseira das partículas na composição da porcelana diminui a retração durante a secagem evitando assim a formação de trincas (ABCERAM, 2012; CAMPOS, 2009; CHINELATTO e SOUZA, 2004).

Mamede Filho, (1994) verificou que modificando as concentrações das matérias-primas básicas dos isoladores é possível obter artefatos com propriedades diferentes, como:

- a) O aumento da porcentagem de quartzo confere maior resistência em temperaturas elevadas, maior resistência mecânica e menor rigidez dielétrica;
- b) O aumento no teor de feldspato confere maior capacidade isolante;
- c) O aumento da resistência a choques térmicos e a menor rigidez dielétrica suportada pelos isoladores são consequência do aumento da porcentagem de argila e caulim.

De acordo com a aplicação da porcelana terá, as quantidades das matérias primas podem sofrer alterações (Figura 3).

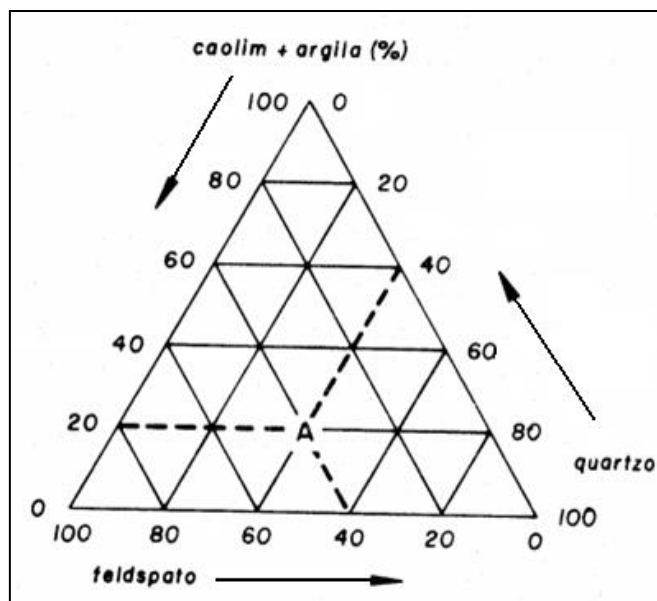


Figura 3 - Triângulo da composição da porcelana (MAMEDE FILHO, 1994).

Segundo Chinelatto e Souza, (2004), para utilização em isoladores elétricos de baixa tensão, uma faixa de composição para porcelanas silicosas é recomendada, onde a quantidade de argila caulínica varia entre 40 e 60%, a quantidade de feldspato varia entre 20 e 35% e a quantidade de quartzo entre 20 e 30%. Estas composições são sinterizadas entre 1250 e 1330°C. Para os isoladores de alta tensão, porcelanas aluminosas, com 15% de caulim, 20% de argila, 25% de feldspato e 40% de alumina, para uma porcelana rica em alumina, e 20% de caulim, 25% de argila, 35% de feldspato e 20% de alumina para uma porcelana com baixo teor de alumina.

Um isolador elétrico cerâmico é caracterizado por apresentar elevada resistividade elétrica, elevada rigidez dielétrica, baixo fator de dissipação e baixa constante dielétrica. A elevada resistividade elétrica previne a passagem de corrente elétrica através do isolador; a rigidez dielétrica, definida como a máxima diferença de potencial que o dielétrico suporta sem que ocorra uma descarga elétrica, deve ser elevada para evitar o colapso catastrófico do isolador em alta voltagem; o fator de dissipação, que mede a razão entre a parte irrecuperável e recuperável da energia elétrica quando um campo elétrico é aplicado no interior do material sendo que a

energia irreversível é consumida na forma de calor, deve ser baixo para que o isolador não aqueça em uso; a baixa constante dielétrica evita polarização de modo a não ocorrer armazenamento localizado de cargas no isolante peça (CHINELATTO e SOUZA, 2004).

Os isoladores elétricos de porcelana após sua vida útil perdem funções isolantes e são substituídos por novas unidades. As concessionárias de energia de todo o país geram dezenas de unidades destes resíduos de isoladores elétricos de porcelana como ilustrado na Figura 4 (FERREIRA *et al.*, 2010).

Ao mesmo tempo em que há uma preocupação com a geração de resíduos da indústria ceramista, as reservas de rochas utilizadas como agregados para a fabricação de concretos diminuem a uma velocidade cada vez maior (SENTHAMARAI e MANOHARAN, 2005).

Com o aumento dos resíduos gerados, o esgotamento de espaços apropriados para seu destino final e a mudança das políticas para a destinação dos resíduos sólidos, em muitos países desenvolvidos vem sendo praticado o reuso desses resíduos como matéria-prima para a produção de novos materiais (PORTELLA, 2006).



Figura 4 - Resíduos de isoladores elétricos de porcelana na Estação Avançada de Vacaria – RS.

A produção de isoladores elétricos de porcelana do ano de 2003, levantados pela ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2012) é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados setoriais dos isoladores elétricos de porcelana (ABCERAM, 2012)

Isoladores Elétricos de Porcelana	
Número de Empresas	6
Número de Fábricas	9
Capacidade Instalada (t/ano)	44.000
Produção (t/ano)	28.000
Faturamento (US\$ milhões)	39
Exportação (US\$ milhões)	13
Importação (US\$ milhões)	1,2
Empregos Diretos	1.700

Dados da Rio Grande Energia (RGE) indicam uma geração atual de 168 t/ano de isoladores elétricos de porcelana no ano de 2003 e, só no interior de São Paulo tem-se um descarte na ordem de 30.000 t/ano de isoladores elétricos de porcelana (CAMPOS, 2009).

De acordo com a definição na Resolução nº 307 do CONAMA, Brasil (2002), os rejeitos de isoladores elétricos de porcelana provenientes do descarte do material inservível ou do controle de qualidade no processo fabril são classificados como resíduos de Classe A (componentes cerâmicos), devendo ser destinados na seguinte forma: “deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura” (BRASIL, 2002).

De acordo com o estudo feito por Franck *et al.*, (2004), os resíduos de isoladores elétricos de porcelana são materiais que possuem composição química similar a dos constituintes do cimento e agregados.

A análise química elementar dos resíduos de isoladores elétricos cerâmicos (Tabela 2), realizada por Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX), em porcentagem mássica estudada por Gomes *et al.*, (2012) revela elevadas concentrações de silício (Si), 75,09 % seguido de alumínio (Al)16,86 %.

Valores esperados para este tipo de material, tendo em vista as matérias-primas utilizadas para sua fabricação (MAMEDE FILHO, 1994).

Tabela 2 - Composição química elementar por FRX em porcentagem mássica. (GOMES *et al.*, 2012)

Componente	Teor (%) (m/m)
Si	75,09
Al	16,86
K	4,42
Fe	1,03
Ca	0,79
Na	0,39
Ti	0,27
Mg	0,18
Pb	0,11
Mn	0,08
Cr	0,07
Rb	0,05
Zn	0,03
Zr	0,02
Cu	0,01
Sr	0,01
*PF	0,44
Total	99,85

* Perda ao Fogo (LOI)

3.2 Concretos e Argamassas com Resíduos Alternativos

Toda atividade humana é por natureza geradora de resíduos, porém, os resíduos gerados das atividades industriais requerem especial atenção em função de sua natureza,

uma vez que dependendo dessa, podem comprometer a atmosfera, o solo, lençóis freáticos, ecossistemas e por consequência, à saúde pública (RIBEIRO *et al.*, 2006).

No ano de 2010, foram consumidas 60 milhões de toneladas de cimento no Brasil, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2012).

Assumindo à relação cimento: agregados (1:5) e a relação água/cimento (0,60), estima-se hoje a produção de 280 milhões de toneladas de concreto. Desse total, 210 milhões são agregados naturais. Nessa utilização é consumida quase metade da produção nacional dos mesmos (IBRACON, 2011).

Agregar resíduos à produção de materiais cerâmicos mantendo as propriedades dos originais, e ainda oferecer aos mesmos maior resistência mecânica, por exemplo, evitaria a exploração e extração dos agregados naturais (CAMPOS, 2009).

Recentemente pesquisas têm buscado por novos materiais e/ ou alternativos para o emprego em concretos e argamassas em substituição parcial ou total dos agregados graúdos e miúdos, e de cimento a estes concretos (MARTÍNEZ *et al.*, 2011).

Segundo Franck *et al.*, (2004), a substituição dos agregados naturais por resíduos de isoladores elétricos de porcelana provenientes das concessionárias elétricas brasileiras é possível pela composição química ser similar à dos agregados naturais. Os autores enfatizam a facilidade de britagem dos isoladores de porcelana, com a substituição ideal entre 20 e 50% em substituição aos agregados do concreto (areia e brita), resultando em boa resistência à compressão.

Na reciclagem de resíduos de gesso, grandes quantidades podem ser reutilizadas na indústria da construção civil. Neste contexto, Alcione *et al.*, (2012), investigaram a resistência à compressão axial de blocos cerâmicos construídos com diferentes proporções de cimento, argila e resíduos de gesso, revelando que a melhor formulação foi a que utilizou 20% dos resíduos de gesso em cimento *Portland*.

Paixão *et al.*, (2011) avaliaram a utilização de resíduos da fabricação de pisos e azulejos, denominado de chamote, como substitutos da areia para a produção de argamassas. Os autores analisaram três resíduos, fornecidos pela mesma empresa e proveniente da quebra na produção de porcelanato, de piso cerâmico e de azulejo. Estes resíduos foram caracterizados fisicamente e comparados com a areia do Rio Jacuí, bem como avaliados sob a forma de mistura em matriz cimentícia. Os três chamotes investigados substituíram em 100% a areia de rio, sendo utilizado o mesmo traço, em massa, na proporção de 1:3 (cimento: agregado miúdo) e relação água/cimento para a argamassa confeccionada foi de água /cimento (a/c) 0,48. Os resultados indicam que o ganho de resistência à compressão foi superior a 100%, aos 28 dias, para a argamassa confeccionada com chamote de piso, apresentando uma pequena redução aos 63 dias.

Quando comparada com os resultados da argamassa apenas com areia de rio, entretanto, o ganho de resistência à compressão foi de 98%. Acredita-se que esta melhoria desempenho mecânico das argamassas produzidas com resíduo cerâmico se deve a redução dimensional do agregado, proporcionando um melhor empacotamento da mistura. Além disto, por este agregado ser mais poroso do que os quartzosos, há maior probabilidade dos cristais de hidratação do cimento se formarem nestes poros, melhorando sensivelmente a zona de transição, e conseqüentemente, a aderência entre a pasta e os agregados (PAIXÃO *et al.*, 2011).

Os resíduos de pneus representam um problema ambiental de gravidade crescente. Elevadas quantidades de resíduos de pneus são simplesmente amontoados em depósitos clandestinos ou depositados em aterro. Em alguns países a borracha proveniente dos resíduos de pneus é utilizada para efeitos de pavimentação, contudo o seu volume representa apenas uma parte dos resíduos já existentes (VIEIRA *et al.*, 2010). Estudos levaram à substituição parcial de agregados naturais do concreto, por

partículas de borracha provenientes de pneus reciclados mostraram que os mesmos apresentam potencial na melhoria do desempenho em termos do isolamento acústico (SIDDIQUE e NAIK, 2004).

Os compostos elastoméricos reciclados podem ser obtidos usando duas tecnologias distintas: a trituração mecânica à temperatura ambiente ou a trituração criogenia a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea, temperatura para a qual a borracha adquire um comportamento frágil (TORGAL e JALALI, 2010).

A incorporação de resíduos elastoméricos de pneus ao concreto despertou o interesse de pesquisadores. Güneyisi *et al.*, (2004), utilizando este tipo de resíduo no concreto, com granulometria na faixa de 4 e 20 mm, em dosagens de 2,5; 5, 10, 15, 25 e 50% em parte iguais em volume ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) dos agregados miúdo (areia) e graúdo (brita), além do emprego de sílica ativa, observaram que o uso de sílica ativa ajudou na redução da perda de resistência à compressão com adição de resíduos elastoméricos, aumentando em até 43 % a resistência dos corpos de prova com os resíduos. Güneyisi *et al.*,(2004) e Hernández *et al.*,(2004) descreveram que o emprego de pneus moídos possibilitaram minimizar problemas ambientais decorrentes da disposição inadequada de pneus, melhorias no desempenho dos concretos na construção civil, além de possibilitar a redução dos custos de alguns produtos.

No grupo dos resíduos poliméricos termoplásticos incluem os resíduos poliméricos termoplásticos de poli (tereftalato de etileno) (PET) utilizados na obtenção de embalagens, que são um dos resíduos poliméricos mais comuns nos resíduos sólidos urbanos (MELLO *et al.*, 2009). Em 2007 o consumo mundial de resíduos de garrafas de PET foi de 250.000 milhões de unidades (o equivalente a 10 milhões de toneladas de resíduos) (TORGAL e JALALI, 2010).

Albano *et al.*, (2009) estudaram a incorporação de resíduos de PET com várias dimensões (2,6mm, 11,4mm e uma mistura de ambas) para duas faixas de volumes (10 e 20%) no concreto. Os resultados obtidos revelaram que os concretos com substituição de 20% das partículas de maior dimensão, devem ser evitadas pelo fato de provocarem redução na resistência à compressão superiores a 60%, o que se deve a problemas de trabalhabilidade. Já uma mistura de 10% de ambas dimensões, revela reduções da resistência menos substanciais, entre 15 a 20%.

Correia *et al.*, (2006) estudaram concretos com substituição de agregados naturais por agregados reciclados cerâmicos os quais foram obtidos a partir da trituração de tijolos cerâmicos, e foram pré-saturado antes da sua utilização no concreto. Estes autores relataram que os concretos com agregados reciclados cerâmicos apresentaram reduções na resistência à compressão de 50%, para uma percentagem de 100% de incorporação destes agregados.

A indústria sanitaria, independentemente das melhorias introduzidas nos processos de fabricação, gera resíduos. Medina *et al.*, (2011) estudaram, quatro tipos de concretos, um concreto referência (RC) e três concretos reciclados (CC-15, CC-20 e CC-25) com substituição de 15, 20 e 25%, respectivamente em massa de agregado grosseiro natural (cascalho) por agregado cerâmico reciclado respectivamente. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão e resistência à tração na flexão com um aumento das resistências em todos os concretos reciclados em comparação ao concreto referência. Os autores afirmam que o aumento da resistência foi devido à zona de transição entre o agregado reciclado e a pasta cimento ser mais compacta e menos porosa do que entre o cascalho e a pasta de cimento.

Costa *et al.*, (2004) também estudaram a incorporação do resíduo da louça sanitária em concretos. Os autores substituíram o agregado graúdo por resíduos de louça

sanitária moída em granulometria similar a brita e o compararam a um traço referência. Os autores obtiveram valores de resistência à compressão superior com a louça sanitária em comparação ao traço referência. A louça sanitária contém sílica tanto na fase vítrea do corpo cerâmico como no esmalte não impedindo à funcionalidade do empacotamento das partículas na formação do concreto.

3.3 Concreto Permeável

Neithalath *et al.*, (2010) e Polastre e Santos (2013), definiram que o concreto permeável é um tipo de concreto com elevado índice de vazios interligados, preparado com pouco ou nenhum agregado miúdo, o que permite a passagem desobstruída de grandes quantidades de água. No concreto permeável, quantidades controladas de água e cimento formam um espesso revestimento em torno das partículas agregadas. Por essa razão, na maioria das misturas não se utiliza agregado miúdo (areia), sendo o concreto confeccionado apenas com água, cimento e agregado graúdo. Em alguns casos usam-se pequenas quantidades de areia para aumentar o volume da camada de recobrimento, sem aumentar o custo.

O concreto permeável possibilita o controle de escoamento de águas pluviais, restauração de lençóis freáticos, reduz ou elimina o escoamento superficial permitindo a filtragem da poluição difusa ocasionados por óleos, fluídos automobilísticos e outras substâncias encontradas na pavimentação urbana, que geralmente são levadas para os cursos d'água (lagos, rios e oceanos) (NEITHALATH *et al.*, 2010). Sua cor clara absorve menor quantidade de radiação solar e sua estrutura pouco densa armazena menos calor, auxiliando na redução do aquecimento das áreas urbanas e ainda, facilita a sobrevivência da arborização localizada em áreas pavimentadas, por permitir a chegada de ar e água até as raízes das plantas (ACI, 2006). O concreto poroso ou permeável foi

desenvolvido como um material ecológico no Japão na década de 1980, porém, por volta de 1942, o concreto permeável já tinha sido usado no Reino Unido para a construção de mais de 900 casas, devido as suas boas propriedades térmicas e baixo custo. Na Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) outra vez o concreto permeável foi amplamente utilizado. A principal vantagem do uso desse concreto era pelo menor consumo de cimento, em relação ao concreto convencional, associado ao baixo custo de execução. Apesar de o concreto permeável ter sido muito utilizado na Europa e na Austrália nos últimos 60 anos, o seu uso como material de construção nas Américas, até o final do século XX foi limitado. A razão reside no fato de que as Américas não vivenciaram a escassez de materiais que a Europa, após a Segunda Guerra Mundial (ACI, 2006; BHUTTA *et al.*, 2012; HÖLTZ, 2011).

O crescente interesse pelo concreto permeável resultou na disseminação de pequenos fornecedores do material e na fundação de uma associação, a *National Concrete Pavement Technology Center* (NPCA) institui uma competição anual na qual incentiva estudantes de graduação a produzir concretos permeáveis para disseminar a tecnologia (HÖLTZ, 2011; MULLIGAN, 2005).

Desde então o concreto permeável tem sido utilizado em diversas aplicações no Japão, EUA e Europa devido aos seus múltiplos além do apelo ambiental (BHUTTA *et al.*, 2012).

Uma alternativa para reverter o grande impacto ambiental que a impermeabilização urbana acarreta ao meio ambiente, tanto direto como indiretamente, seria a adoção de tecnologias limpas, que permitissem uma maior infiltração da água pluvial, pois, os resíduos residenciais acabam sendo levados pelas águas pluviais para as tubulações de drenagem, prejudicando o escoamento do esgoto pluvial (ACI, 2006; HÖLTZ, 2011).

O ruído gerado pelo tráfego, devido à rápida urbanização e ao acelerado crescimento do número de veículos, tornou-se um sério problema. A superfície porosa do concreto permeável minimiza o bombeamento do ar para dentro e para fora dos blocos da banda de rodagem do pneu, que é atualmente considerado um dos principais mecanismos de geração de ruído no trânsito. O mecanismo chamado de bombeamento do ar é ocasionado quando os sulcos do pneu são comprimidos e distorcidos. O ar que entra nestes canais é bombeado para dentro e comprimido para fora destas passagens, gerando assim o ruído. Entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a textura de um pavimento existem poros preenchidos com ar. Com a rolagem dos pneus, em alguns poros esse ar é expulso e em outros, o ar é aprisionado e comprimido. Os principais fatores que determinam a eficiência do concreto permeável na absorção de som são a porosidade, tamanho dos poros e a espessura da camada porosa. Para os concretos permeáveis serem eficazes na absorção do som é recomendada uma porosidade entre 15 e 25% (por volume total do material) (NEITHALATH *et al.*, 2006).

Devido a estes benefícios o concreto permeável tem sido utilizado na pavimentação de estradas, calçadas, praças e exteriores de edifícios (BHUTTA *et al.*, 2012). Outras aplicações do concreto permeável são ilustradas na Figura 5.

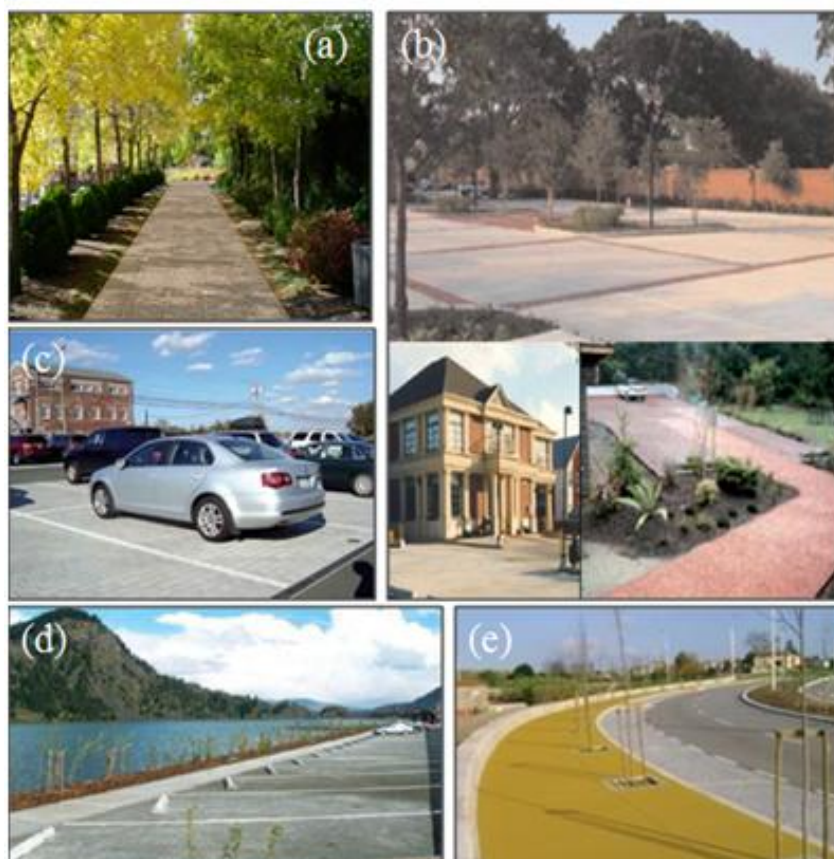


Figura 5 - Aplicações do concreto permeável. (a) parques; (b) pátios residenciais, estufas de plantas; (c) estacionamentos; (d) ruas de baixo tráfego; (e) ciclovias (IBRACON, 2011).

A Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA, *US Environmental Protection Agency*) classificou os pavimentos permeáveis de *Best Management Practice* (BMPs). Assim, sua utilização tem grande potencial de auxiliar um projeto a conquistar a certificação *US Green Building Council Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Para o LEED, a sustentabilidade do concreto permeável advém de três características básicas: auxilia na redução do aquecimento terrestre, é um material reciclável e pode utilizar materiais locais (HUFFMAN, 2005).

A Figura 6 fornece a visualização da textura *in – situ* do concreto permeável e do concreto convencional.

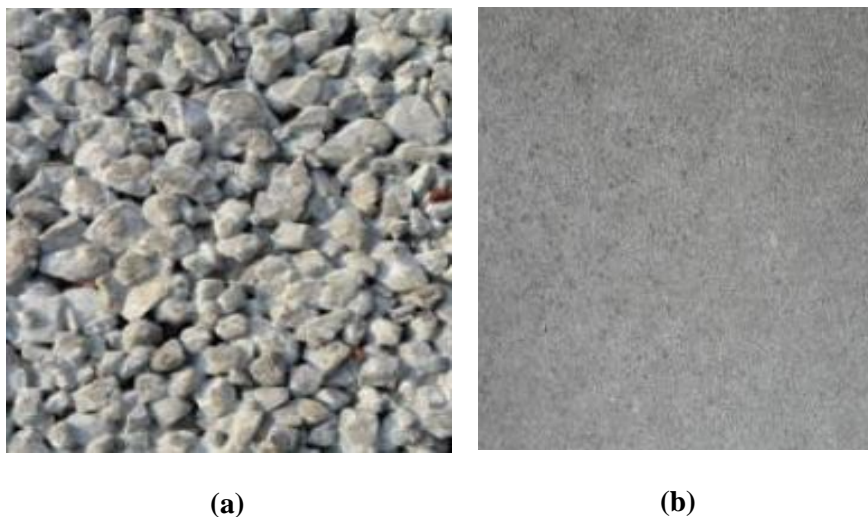


Figura 6 - (a) Textura do concreto permeável e (b) do concreto convencional vista do topo (MULLIGAN, 2005).

3.3.1 Características do Concreto Permeável

O concreto permeável difere do concreto convencional por várias características. Comparado com um concreto convencional, o concreto permeável tem uma resistência à compressão inferior, maior permeabilidade a água e uma massa unitário menor, cerca de 70% do concreto convencional (MULLIGAN, 2005).

As curvas granulométricas utilizadas nas misturas dos concretos permeáveis podem ser uniformes (uma mesma dimensão de partícula), sendo o diâmetro máximo utilizado de 19 mm, curvas granulométricas contínuas, com a mistura de dois ou três diâmetros de agregados ou ainda descontínuas, com a variação do diâmetro do agregado em 19 a 4,8 mm, 9,5 a 2,4 mm e 9,5 a 1,2 mm (BATEZINI, 2013).

O concreto permeável no estado fresco é caracterizado por apresentar elevada consistência, sendo o abatimento de tronco de cone geralmente menor que 20 mm (ACI,

2006). Ensaios de massa unitária e controle visual são os métodos mais empregados no processo de abatimento de tronco de cone (TENNIS *et al.*, 2004; PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2011).

O controle da proporção de água é essencial para que a pasta de cimento não obstrua os poros do concreto permeável. Lian e Zhuge, (2010) descreveram que a proporção de água/cimento (a/c) a ser usada deve ser relativamente baixa (0,30 – 0,40). A recomendação ACI 522R indica que a faixa de relação a/c apropriada para a produção de concretos permeáveis varie entre 0,26 a 0,45 (ACI, 2006). Dellate, (2007) recomendou a utilização de fator água/cimento entre 0,25 a 0,35. Para o *National Concrete Pavement Technology Center* (SCHAEFER *et al.*, 2006) o valor deve ficar entre 0,35 e 0,45 e o índice de vazios entre 15 e 25%, com resistência a compressão a 28 dias de idade de 14 a 17,5 MPa e a resistência a tração na flexão de 3 a 4 MPa.

Crouch *et al.*, (2006), afirmou que a relação água/cimento varia de acordo com fatores tais como o índice de vazios desejado e tamanho do agregado e pode variar de 0,25 a 0,45. A utilização de aditivos como redutores da água (plastificantes ou hiperplastificantes); incorporadores de ar são permitidos. Assim sendo, realizar experimentos de dosagem em laboratório para alcançar a melhor proporção tem sido uma prática fundamental (LIAN e ZHUGE, 2010).

3.3.2 Propriedades de Concretos Permeáveis

3.3.2.1 Permeabilidade de Água

A taxa de drenagem do concreto permeável varia conforme o tamanho de partícula do agregado e a densidade da mistura (NGUYEN *et al.*, 2013). A taxa de drenagem de água geralmente se situa em uma escala de 81 a 730 $L \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$

(ACI, 2006). De acordo Tennis *et al.*, (2004), a permeabilidade de água típica para um concreto permeável é de 0,2 a 0,54 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, com taxas de até 1,2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. As propriedades do concreto permeável de cimento *Portland* relatadas de obras executadas nos Estados Unidos da América (EUA) indicaram uma permeabilidade variando de 2×10^{-2} a $6 \times 10^{-1} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (SCHAEFER *et al.*, 2006). Para Neithalath *et al.*, (2006) a permeabilidade de água de concretos permeáveis é da ordem de 0,1 a 0,01 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, em relação a $10^{-10} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ nos concretos normais.

O coeficiente de permeabilidade é uma medida quantitativa que caracteriza o fluxo de água através de um meio poroso. É derivada da Lei de Darcy de meios porosos é um parâmetro importante na modelagem matemática da simulação da percolação da água, possibilitando caracterizar o fluxo de água. Esta propriedade varia com o teor de água no meio poroso, sendo geralmente considerada como uma função do grau de saturação dos meios de comunicação ou a absorção de água pela matriz de concreto (ACI, 2006; NEITHALATH *et al.*, 2003).

Existem métodos na literatura determinados a partir da Lei de Darcy que possibilitam medir a condutividade hidráulica de materiais porosos na condição saturada de água, contudo, estudos realizados por diferentes autores mencionam a saturação do corpo de prova poroso em água como uma exposição inicial do mesmo durante a realização do experimento (NEITHALATH *et al.*, 2006; TENNIS *et al.*, 2004).

Existem dois distintos tipos de permeômetros para medição do coeficiente de permeabilidade de água: o de carga constante e o de carga variável. O de carga constante determina o coeficiente de permeabilidade de água medindo a vazão constante de água que atravessa a amostra por determinado tempo de leitura fixado (BHUTTA *et al.*, 2013; ZAETANG *et al.*, 2013). Neste tipo de permeômetro, os autores utilizaram

para o cálculo do coeficiente de permeabilidade a Equação 1. O permeâmetro de carga variável determina o coeficiente de permeabilidade de água medindo o decréscimo do volume de água (fixo inicialmente) que atravessa o concreto durante o tempo de percolação (LIAN e ZHUGE, 2010; NEITHALATH *et al.*, 2003; NEITHALATH *et al.*, 2006; NEITHALATH *et al.*, 2010, TENNIS *et al.*, 2004). Neste tipo de permeâmetro, os autores utilizaram para o cálculo do coeficiente de permeabilidade a Equação 2.

$$k = \frac{QL}{HAt} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo k o coeficiente de permeabilidade à água em $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, Q é a quantidade de água recolhida em cm^3 ao longo do tempo t em s, L é o comprimento da amostra em cm, H é a diferença do nível entre a coluna de água superior (h_2) e a inferior (h_1) em cm, e A área da seção transversal da amostra cm^2 .

$$k = \frac{aL}{At} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo k o coeficiente de permeabilidade à água em $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, a é a área interna do tubo de carga em cm^2 , A é a seção transversal da amostra em cm^2 , L é o comprimento da amostra em cm, t é o tempo em s necessário para o nível de água passar de h_1 (altura inicial da coluna de água em cm) para h_2 (altura final da coluna de água em cm).

Neithalath *et al.*, (2003), descreve que a permeabilidade do concreto pode ser medida em laboratório, por meio de um permeâmetro de carga variável (Figura 7).

Usando este dispositivo, a amostra é colocada entre uma membrana de látex para evitar que ocorra vazamento ao longo das laterais da mesma. Adiciona-se água ao cilindro graduado para encher a amostra e o tubo de drenagem. A amostra é pré-acondicionada para permitir que a água seja drenada através do tubo até que o nível no

interior do cilindro graduado seja o mesmo que na parte superior do tubo de drenagem. Isto minimiza quaisquer bolsas de ar na amostra e assegura que a amostra esteja completamente saturada. Com a válvula fechada, o cilindro graduado é cheio com água. A válvula é então aberta, e o tempo em segundos (t) necessários para que a água percole pelo mecanismo, entre o ponto inicial (h_1) e o ponto final (h_2) é medido. O equipamento é calibrado para uma carga inicial de 290 mm (h_1) e, uma carga final de 70 mm (h_2). Este procedimento deve ser medido três vezes para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), determinado pela Lei de Darcy (Equação 2).

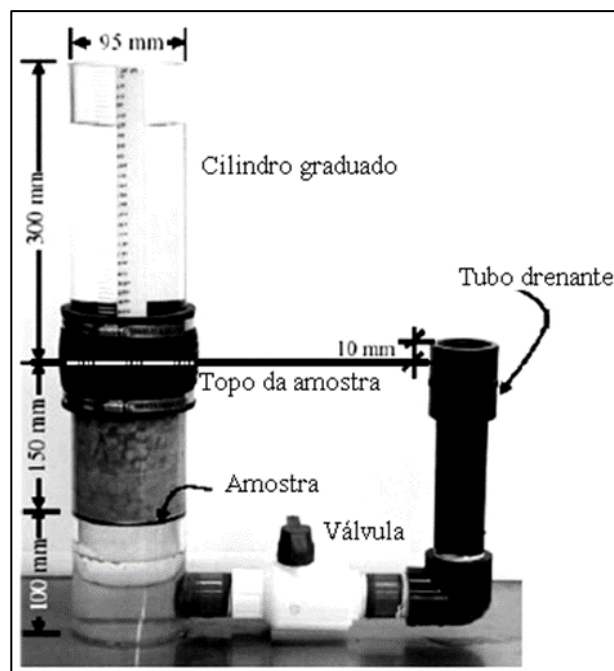


Figura 7 - Mecanismo proposto para a medição do coeficiente de permeabilidade de água (NEITHALATH *et al.*, 2003).

O Quadro 1 apresenta parâmetros de coeficiente de permeabilidade, propostos por diferentes autores, medidos por distintos mecanismos.

Coeficiente de permeabilidade	Método	Autor
2,4 a 3,7 cm·s ⁻¹ 0,9 a 3,1 cm·s ⁻¹ 0,3 a 4,77 cm·s ⁻¹	Carga constante	BHUTTA <i>et al.</i> , (2013); BHUTTA <i>et al.</i> , (2012); ZAETANG <i>et al.</i> , (2013).
0,14 cm·s ⁻¹ 0,2 cm·s ⁻¹ a 1,2 cm·s ⁻¹ 2 x 10 ⁻² cm·s ⁻¹ a 6 x 10 ⁻¹ cm·s ⁻¹ 0,1 a 0,01 cm·s ⁻¹	Carga variável	ACI, 2006; TENNIS <i>et al.</i> , (2004) e CROUCH <i>et al.</i> , (2006); NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010; NEITHALATH <i>et al.</i> , (2006).

Quadro 1 - Parâmetros de coeficiente de permeabilidade propostos por diferentes autores (fonte: o autor).

3.3.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos Permeáveis

A densidade do concreto permeável depende das propriedades e das proporções dos materiais utilizados e dos procedimentos de compactação usados em sua aplicação (HUFFMAN, 2005). Em geral, encontram-se densidades na ordem de 1600 kg·m⁻³ a 2000 kg·m⁻³, podendo ser executado *in loco*, com materiais locais, evitando elevados custos de transportes (NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010; TENNIS *et al.*, 2004).

Segundo ACI 522R as misturas de concreto permeável podem apresentar resistência à compressão variando entre 3,5 a 28 MPa e um índice de 15 a 25% de vazios (ACI, 2006). A alta porosidade reduz a resistência deste material em relação ao concreto comum, de modo que ele não pode ser utilizado em todo tipo de tráfego, mas é adequada a maior parte dos locais de tráfego leve ou pouco intenso. Em estacionamentos, por exemplo, uma resistência à compressão de 13,8 MPa (2000 psi) é aceitável e resistência ainda mais baixa quando o concreto receber cargas de veículos

leves (CROUCH *et al.*, 2006). A resistência à flexão em concretos permeáveis geralmente varia entre cerca de 150 psi (1 MPa) e 550 psi (3,8 MPa). Muitos fatores influenciam a resistência à flexão, em especial o grau de compactação e a porosidade (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2011).

A resistência do concreto é de fato determinada pelas propriedades da argamassa, agregados graúdos e a zona de transição entre os dois (VANCURA *et al.*, 2011). Segundo Lian e Zhuge, (2010), em concretos permeáveis, a zona de fratura, após o carregamento, ocorre predominantemente na zona de interface pasta/agregado, devido à menor quantidade desta pasta que envolve os grãos de brita.



Figura 8 - Fratura de uma amostra de concreto permeável predominantemente na zona de interface pasta/agregado (LIAN e ZHUGE, 2010).

A textura e a angularidade dos agregados contribuem para o ganho ou a perda da resistência mecânica do concreto permeável devido, principalmente, à interligação das partículas pelo aumento ou não, da área total da superfície disponível para a aderência da pasta de cimento ao agregado. Portanto, o aumento da força pode ser explicado pelo

aumento da superfície de contato ou de união quando as dimensões dos agregados decrescem (LIAN e ZHUGE, 2010).

Agar–Ozbek *et al.*, (2013) estudaram misturas de concretos permeáveis com diferentes agregados: cascalho proveniente de rio e basalto triturado. O cascalho de rio tende a ter uma forma mais arredondada em comparação ao basalto triturado que tem uma forma mais alongada e angular. Os agregados de basalto também têm uma textura áspera. Devido a estas diferenças de forma e textura, o cascalho proveniente de rio tem um melhor empacotamento e, portanto, as misturas de concreto permeável desenvolvidas com ele terão uma porosidade menor em comparação ao basalto triturado. Pelo contrário a textura áspera e angularidade dos agregados de basalto contribuem no ganho de resistência mecânica do concreto permeável, por exemplo, a resistência à compressão de 29,6 MPa para o concreto permeável com cascalho de rio e 50,5 MPa para o concreto permeável com basalto triturado, o aumento da resistência à compressão é atribuído ao maior intertravamento mecânico, aumento da área superficial e o aumento dos pontos de contato.

A Figura 9 apresenta fatores que podem afetar as propriedades mecânicas do concreto permeável, alguns dos quais dependem uns dos outros e, por consequência, afetam as propriedades finais de uma forma combinada. A quantidade de pasta de cimento presente na mistura também é de fundamental importância. Preencher todo o espaço disponível entre os agregados com pasta de cimento permite alcançar altas forças, usando baixas quantidades de pasta de cimento funciona da maneira oposta. Portanto, a quantidade de pasta de cimento e a porosidade têm uma importante relação e devem ser otimizadas de acordo com os requisitos de aplicação (AGAR-OZBEK *et al.*, 2013).

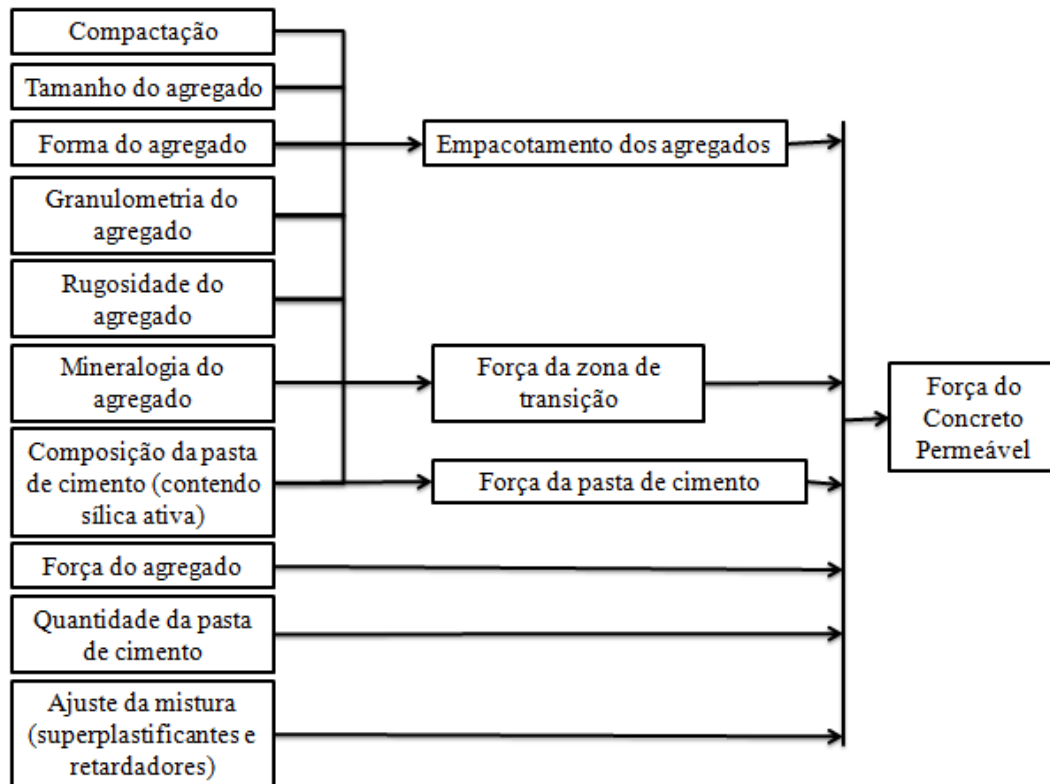


Figura 9 - Fatores que afetam a resistência mecânica do concreto permeável (AGAR-OZBEK *et al.*, 2013).

3.3.2.3 Concretos Permeáveis com emprego de Resíduos Alternativos

O uso de resíduos de construção como fonte de agregados de concretos tornou-se usual nos últimos anos. O custo crescente dos aterros e a escassez de recursos naturais incentivam a utilização de resíduos da construção civil como fonte de agregado (PAIXÃO *et al.*, 2011).

Bhutta *et al.*, (2013) desenvolveram concretos permeáveis substituindo inteiramente os agregados naturais (areia e brita) por resíduos de concreto armado provenientes de construção e demolição de prédios. Foi realizado um monitoramento do índice de vazios, do coeficiente de permeabilidade, da resistência à compressão e da tração na flexão. Aditivos poliméricos foram adicionados nas proporções polímero/cimento (p/c) de 0, 3 e 5%. A adição dos polímeros aumentou a

trabalhabilidade da pasta de cimento permitindo que o agregado fluísse, resultando numa leve diminuição do índice de vazios. A resistência à compressão de concretos permeáveis com agregados reciclados foi melhorada em 79% quando utilizado a proporção p/c de 5% do copolímero de butadieno-estireno em pó e em emulsão.

Com o objetivo de melhorar a resistência à compressão do concreto permeável, sem perder a permeabilidade, buscando suportar maior volume de tráfego, Lian e Zhuge, (2012), estudaram que a adição de aditivos minerais como sílica ativa aumentava a força da ligação da zona de interface pasta/agregado elevando os valores de resistência à compressão.

Em estudos realizados por Zaetang *et al.*, (2013), dois tipos de agregados leves foram utilizados para a produção de concretos permeáveis: diatomita (DA) e pedrapomes (PA) foram usados como agregados naturais. Três teores de pasta de cimento, 15, 20 e 25% (em volume) foram utilizados. Os resultados foram comparados com concretos permeáveis contendo agregados leves reciclados a partir de concreto celular autoclavado (CCA). O índice de vazios, o coeficiente de permeabilidade da água, densidade, resistências à compressão, à tração e o coeficiente de condutividade térmica foram avaliados. Para todas as dosagens foi utilizada uma proporção a/c de 0,24. Os agregados foram cominuídos para alcançar diâmetros de partículas 4,8 – 9,5 mm. Os autores destacam que ao aumentar o teor de pasta de cimento de 15 para 25%, as propriedades mecânicas aumentavam. Concretos permeáveis contendo diatomita e teor de pasta de cimento 25% apresentaram a maior resistência à compressão aos 28 dias de 5,99 MPa. Quando o teor de pasta de cimento dos concretos permeáveis aumentou de 15 para 20%, os coeficientes de permeabilidade à água foram reduzidos, por exemplo, de 4,77 para 1,30 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para concretos permeáveis com PA, indicando que os vazios diminuíram.

Nguyen *et al.*, (2013) estudaram a utilização dos resíduos de carapaças de moluscos marítimos como um substituto parcial de agregados em pavimentos de concretos permeáveis. A fração de agregado graúdo foi parcialmente (20 e 40% em massa), substituído pelos resíduos de carapaças de moluscos. Foram usadas duas frações diferentes de diâmetro de partícula 2–4 mm e 4–6,3 mm. Neste estudo foi avaliado o coeficiente de permeabilidade, a resistência à compressão e tração na flexão. A substituição do cascalho pelos resíduos de carapaças de moluscos aumentou a porosidade pela forma plana do resíduo, porém, interferiu no arranjo granular, reduzindo a compactação. Uma parte dos resíduos de moluscos (2–4 mm) preencheu os vazios, diminuindo a porosidade. Em contraste, a categoria 4–6,3 mm alteraram os arranjos granulares, resultando numa diminuição da resistência mecânica, porém promovendo um aumento da permeabilidade de água.

Huang *et al.*, (2010) descreveram que a utilização de areia de rio para substituir 7% em massa do agregado grosseiro melhora a resistência aos 7 dias de idade de 9,6–4,5 MPa a 22,2–22,7 MPa do concreto. Embora o teor de vazios seja reduzido devido à areia fina nas misturas, todos os valores de índice de vazios ficaram dentro de uma faixa aceitável (> 15%) para aplicações em concreto permeável de cimento *Portland*.

No estudo realizado por Sata *et al.*, (2013) o uso de agregados reciclados para produzir concretos geopoliméricos permeáveis (CGP) foi estudado. Os CGP foram preparados a partir de cinzas volantes, solução de silicato de sódio (Na_2SiO_3) com 15,32% Na_2O , 32,87% SiO_2 e 51,81% de água, solução de hidróxido de sódio (NaOH) 10, 15 e 20 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, e dois tipos diferentes de agregados, concreto estrutural triturado (CT) e tijolo moído (TM) com dimensões de partícula de 4,5-9,5 mm. Os resultados foram também comparados com os de um concreto permeável convencional utilizando

agregado grosso natural. A resistência à compressão, resistência à tração na flexão, índice de vazios e coeficiente de permeabilidade à água dos concretos foram determinados. Os concretos contendo os resíduos CT e TM tiveram resistência à compressão mais baixa do que aqueles que continham agregados naturais. No entanto, as resistências à compressão obtidas de 2,9 – 10,3 MPa estão dentro dos valores de resistência relatados pelo ACI 522R, afirmam os autores. Os resultados da resistência a tração na flexão foram de 0,4 e 1.8 MPa. Os resultados seguiram a mesma tendência que os da resistência à compressão. Os baixos valores de resistência mecânica foram atribuídos à camada fina de argamassa aderida no agregado reciclado. Além disso, a baixa densidade e resistência à abrasão dos resíduos também contribuiu principalmente para a resistência à compressão baixa. O índice de vazios de 26,9%, e coeficiente de permeabilidade à água de $0,71-1,2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, em concretos geopoliméricos permeáveis incorporando agregados grossos reciclados foram semelhantes aos do concreto permeável convencional. Os resultados indicam que tanto o CT e TM podem ser usados como agregados grossos reciclados para produzir concretos geopoliméricos permeáveis com propriedades aceitáveis.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O cimento utilizado foi o CPIV-32, comercializado pela Votorantin Cimentos.

O agregado miúdo é uma areia de cava proveniente da Sampar Comércio e Participações LTDA de Viamão-RS.

O agregado graúdo é uma brita de origem basáltica que provém da Mineração Florense de Flores da Cunha-RS.

Os resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP) são provenientes da Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL – SP/Brasil, coletados nas estações avançadas (EA) de resíduos da própria empresa.

O gesso utilizado para capear as amostras (placas) de concretos permeáveis, é da marca Juntalider, comercializado pela ZB Materiais de Construção, Veranópolis – RS.

O silicone utilizado para vedar as laterais das amostras (placas) de concretos permeáveis no teste de permeabilidade, é um silicone acético para vidros da marca Tytan incolor, comercializado pela ZB Materiais de Construção, Veranópolis – RS.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização das Matérias-Primas

A caracterização das matérias-primas deste estudo foi realizada pelas técnicas e métodos a seguir descritos.

O cimento utilizado foi caracterizado, segundo fabricante (ANEXO 1), por massa específica (g/cm^3), resistência à compressão (MPa) após 3, 7 e 28 dias, ensaios

químicos do Cimento CP IV-32, percentual de CO₂ (%), SO₃ (%), e resíduo insolúvel (%).

Os agregados graúdos (brita 0 e brita 1) foram caracterizados pela distribuição granulométrica do proporcionamento de acordo com a norma NBR 7211-05.

A absorção de água do agregado graúdo foi determinada de acordo com a norma NBR NM53-09 (ABNT, 2009) (Equação 3).

$$A = \frac{m_{sss} - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Sendo A , a absorção de água em porcentagem; m_{sss} a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas e m a massa ao ar da amostra, em gramas.

O índice de forma do agregado graúdo foi determinado pela norma NBR 7809-08 (ABNT, 2008) faz uso de paquímetro e toma como parâmetro o agregado graúdo (Equação 4).

$$\text{Índice de forma} = \frac{l}{b} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo l a medida do comprimento de um grão (a maior dimensão possível de ser medida e define a direção do comprimento); b a espessura de um grão (a maior distância possível entre dois planos paralelos à direção do comprimento do grão).

A Figura 10 ilustra as dimensões L e b consideradas para definição de índice de forma.

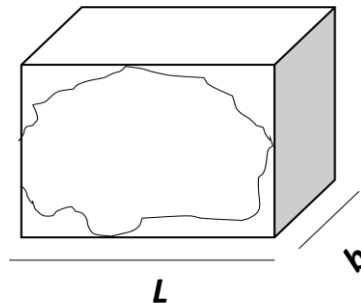


Figura 10 - Relação entre a maior (L) e a menor dimensão (b) para o cálculo de índice de forma.

4.2.2 Cominuição e Caracterização dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana

Neste estudo os RIP foram cominuídos segundo metodologia proposta por Gomes *et al.*, (2012). Esta atividade foi realizada no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Para os resíduos de isoladores elétricos de porcelana foi realizada a distribuição granulométrica de cada proporcionamento, de acordo com a norma NBR 7211-09.

A preparação dos corpos de prova e os ensaios de caracterização dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana foram realizados no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LABTEC/UCS).

O procedimento adotado na determinação da massa específica foi o de agregado miúdo com o volume determinado pelo frasco de Chapman (Equação 5).

$$\gamma_{esp.} = \frac{m_{grãos}}{V_{grãos}} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo $\gamma_{esp.}$ a massa específica do agregado miúdo em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $m_{grãos}$ a massa ao ar da amostra seca de RIP em kg; $V_{grãos}$ a diferença entre os volumes inicial e final em m^3 .

A absorção de água do agregado graúdo foi determinada de acordo com a norma NBR NM 53-09 (ABNT, 2009) (Equação 6).

$$A = \frac{m_{sss} - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Sendo A , a absorção de água em porcentagem; m_{sss} a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas e m a massa ao ar da amostra, em gramas.

O método de ensaio do índice de forma é determinado pela norma NBR 7809-08 (ABNT, 2008) que faz uso de paquímetro e toma como parâmetro o agregado graúdo (Equação 7).

$$\text{Índice de forma} = \frac{l}{b} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo l a medida do comprimento de um grão (a maior dimensão possível de ser medida e define a direção do comprimento); b a espessura de um grão (a maior distância possível entre dois planos paralelos à direção do comprimento do grão).

4.3 Incorporação dos Agregados Reciclados dos Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis - Estudo Exploratório

O estudo exploratório foi realizado com uma série de concretagens com o objetivo de propiciar a avaliação de traços com a incorporação de agregados reciclados de RIP nas granulometrias que variaram entre 12,5; 9,5; 6,3; 4,8; 2,4 mm, sendo estas, parte da granulometria inicial obtida, com pouca ou nenhuma areia. Tomando como referência os parâmetros apresentados no ACI 522R, foram definidas as proporções que são apresentadas na Tabela 3. As proporções foram codificadas, sendo; concreto A550 de proporção 1:5 e uma relação de água/cimento de 0,5, B550 proporção 1:5 e uma relação de água/cimento de 0,5, C440 1:4 e uma relação de água/cimento de 0,4; D440

proporção 1:4 e uma relação de água/cimento de 0,4; E440 proporcionamento 1:4 e uma relação de água/cimento de 0,4 e F435 proporção 1:4 e uma relação de água/cimento de 0,35.

Tabela 3 - Proporções dos concretos permeáveis do estudo exploratório

Proporções (códigos)	Relação 1:m (cimento/agregados secos)	Relação a/c*	Granulometria de RIP (mm)					Teor de argamassa (%)
			12,5	9,5	6,3	4,8	2,4	
			% do retido em massa					
A550	1:5	0,5		25	25	25	25	40
B550	1:5	0,5	25	25	25	25	25	40
C440	1:4	0,4		25	25	25	25	40
D440	1:4	0,4	25	25	25	25	25	40
E440	1:4	0,4	20	20	20	20	20	40
F435	1:4	0,35	25	25	25	25	25	40

* a/c: água/cimento.

4.3.1 Preparação dos Corpos de Prova das Proporções do Estudo Exploratório

As proporções foram misturados em uma argamassadeira, marca Marte, modelo LC5, com precisão de 0,1 g, conforme Tabela 3. Foi produzido um corpo de prova, na forma de placa, para cada formulação, em moldes de madeira, com as dimensões de 200 x 200 x 30 mm (largura x comprimento x altura). O adensamento do concreto nos moldes foi realizado com 10 quedas em mesa de adensamento utilizada em ensaios de acordo com NBR 5738-08.

Após o adensamento, os moldes contendo as respectivas composições foram cobertos com folhas de jornal molhadas para evitar o ressecamento superficial. Os corpos de prova permaneceram durante 24 h na capela para o endurecimento do concreto segundo o estabelecido pela NBR 5738-08 (ABNT, 2008).

Como parâmetros avaliados no estudo exploratório têm-se: relação água/cimento (a/c); permeabilidade da água e relação cimento/materiais secos (1/m).

4.3.2 Caracterização das Proporções do Estudo Exploratório

- Relação água/cimento (a/c)

A relação água/cimento para as proporções do estudo exploratório (Tabela 3) é uma das variáveis testadas. Os valores da relação água/cimento de 0,35–0,4–0,5 são testados, pois, quantidades em excesso de água conduzirão a uma pasta de cimento muito fluida e subsequente entupimento do sistema de poros.

- Permeabilidade da água

Os seis corpos de prova do estudo exploratório foram submetidos ao teste de permeabilidade (percolação) da água, sendo a condição de partida da amostra, seca em estufa por 24h $\pm 105^{\circ}\text{C}$. Um sistema foi desenvolvido nesta proposta, buscando monitorar a permeabilidade da água nos concretos com RIP.

O ensaio de permeabilidade da água foi realizado em um dispositivo desenvolvido neste estudo, ilustrado na Figura 11 e com dimensões como apresentado na Figura 12. O dispositivo de medição foi proposto considerando um sistema de carga variável.

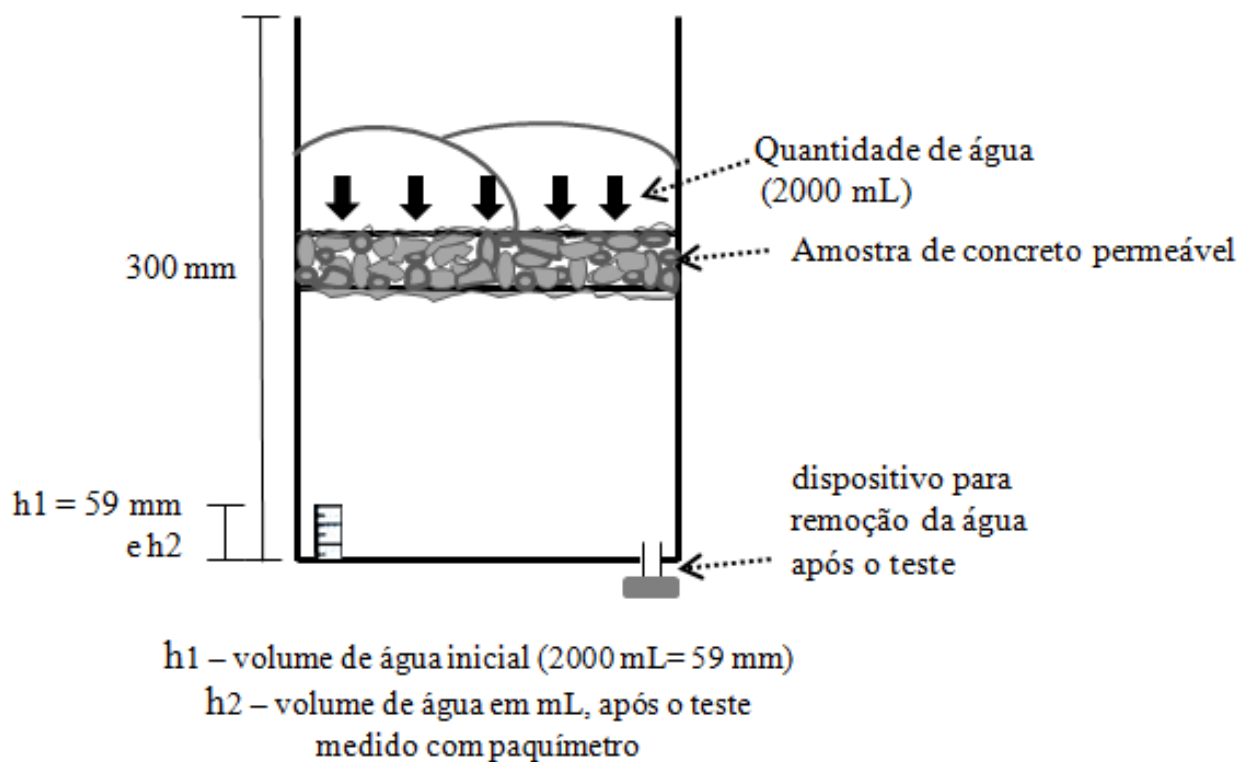


Figura 11 - Representação esquemática do sistema de medição da permeabilidade da água em placa de concreto (Fonte: o autor).

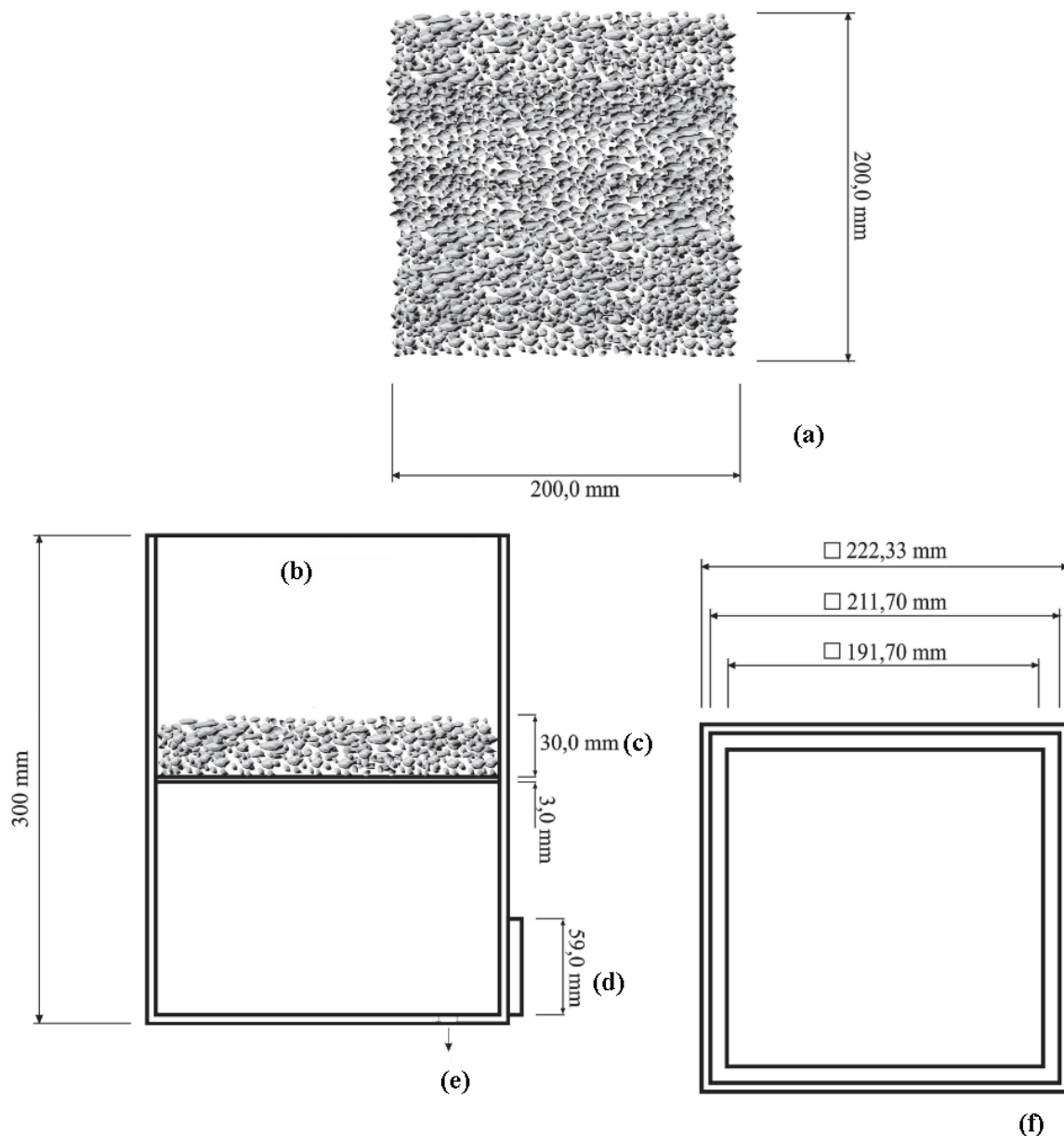


Figura 12 - Dimensionamento do sistema de medição da permeabilidade da água em placa de concreto sendo (a) vista superior da placa de concreto e dimensões em mm², (b) espaço para disposição de água a ser utilizada no teste, (c) espessura da placa de concreto (d) (Fonte: o autor).

O dimensionamento do sistema de medição do coeficiente de permeabilidade proposto foi construído com vidro, possui dimensões 222,33 mm de lado externo, 211,70 mm de lado interno e 300,0 mm de altura (Figura12 f). Filetes de vidro foram colados na parte interna do mecanismo na altura de 150,0 mm servindo como suporte da placa a ser testada (placas). O sistema possui uma régua volumétrica fixada ao seu

corpo que possibilita a medição do volume de água dentro do sistema (Figura 12 d). Para o teste foram utilizados 2L de água, equivalente a 59 mm na régua volumétrica. Uma tampa na base do mecanismo veda a saída da água (Figura 12 e).

Antes da realização do ensaio com amostra, foi medido o volume ocupado na régua volumétrica pelos 2L de água (h_1 = valor obtido de 59 mm). Na sequência, a placa de concreto nas dimensões 200 x 200 x 30 mm foi acoplada ao sistema. As laterais da placa foram vedadas para evitar caminhos preferenciais para água. Foram adicionados 2 L de água em dois dispositivos que foram dispostos sobre a placa (Figura 12 b). Os dispositivos que armazenam a água foram abertos e liberaram a água de forma homogênea em toda extensão da placa, sendo este o momento considerado o início da medida do tempo (t) de escoamento de água entre o ponto inicial (h_1) e o ponto final (h_2), sendo essa a medida da água após o ensaio, medido com o auxílio de um paquímetro digital. O coeficiente de permeabilidade foi medido segundo a Equação 8.

Neste estudo foi utilizado o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), determinado pela Lei de Darcy (Equação 8):

$$k = \frac{aL}{At} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo k o coeficiente de permeabilidade à água em $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, a é a área interna do tubo de carga em cm^2 , A é a seção transversal da amostra em cm^2 , L é o comprimento da amostra em cm, t é o tempo em s necessário para o nível de água passar de h_1 (altura inicial da coluna de água em cm) para h_2 (altura final da coluna de água em cm).

- Relação cimento/materiais secos (1/m)

A relação cimento/materiais secos nas proporções do estudo exploratório é testada com m (agregados secos) entre 4 e 5 (Tabela 3).

4.4 Preparação e Análise de Propriedades das Proporções de Concretos Permeáveis – Referência, 50 e 100% em RIP

No estudo exploratório os parâmetros avaliados da composição possibilitaram que se fixasse algumas variáveis para a sequencia dos desenvolvimentos do estudo. Foram fixados os valores de coeficiente de permeabilidade ($0,16 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), água/cimento (0,35) e cimento/ materiais secos (1:4), valores estes provenientes do proporcionamento F435. Esse proporcionamento foi o que apresentou o comportamento próximo ao concreto permeável.

Os parâmetros fixados serviram de base para a produção de três proporcionamentos de concretos: concreto referência (CR) com a utilização de agregado graúdo (brita) em substituição ao RIP, e dois concretos identificados como CP-50 e CP-100, sendo substituído 50 e 100%, em massa, dos agregados graúdos naturais por resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP), respectivamente.

Considerando como referência os parâmetros apresentados no ACI 522R e do estudo exploratório, foram definidas as proporções que são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporções dos concretos permeáveis: referência, 50 e 100% em massa de resíduos de isoladores elétricos de porcelana

Proporcionamento unitário	Relação 1: p: r* (cimento: brita: RIP)	Relação a/c*
CR	1 : 4	0,35
CP-50	1 : 2 : 2,31	0,35
CP-100	1 : 4,63	0,35

* p: r: brita e RIP; a/c : água/cimento

4.4.1 Avaliação da Massa Unitária - Proporções dos Concretos Permeáveis

Para monitorar as propriedades do CR e dos CP-50 e CP-100 realizou-se o ensaio de massa unitária segundo a norma NBR NM45-06 (ABNT, 2006), de acordo com a Equação 9.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{v} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo m_{ar} , a massa do recipiente vazio em kg, m_r massa do conjunto em kg, ρ_{ap} a massa unitária do agregado em kg.m^{-3} e v o volume do recipiente em m^3 .

4.4.2 Avaliação do Abatimento de Tronco de Cone - Proporções dos Concretos Permeáveis

A moldagem dos corpos de prova das formulações RC, CP-50 e CP-100 foram realizadas em betoneira. No estado fresco o concreto foi submetido ao abatimento de tronco de cone, conhecido como *Slump test*. A Figura 13 ilustra a sequência esquemática do ensaio de abatimento de tronco de cone.

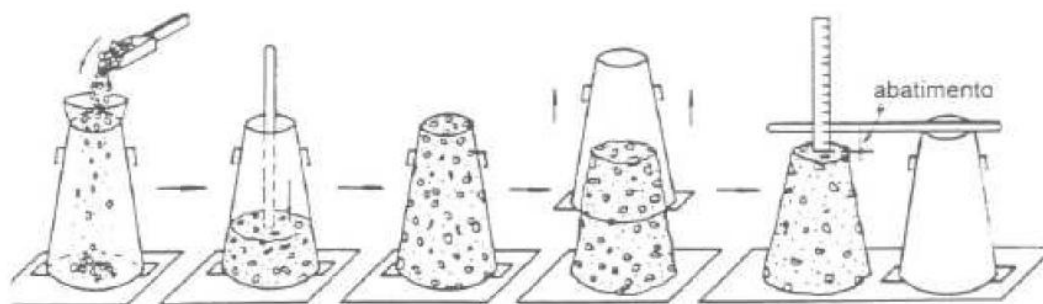


Figura 13 - Sequência esquemática do ensaio Slump test.
ABNT NM 67 – 98.

A cura dos corpos de prova em formas cilíndricas metálicas de dimensões 100 x 200 mm (diâmetro x altura), e prismáticas de dimensões 75 x 75 x 285 mm³ segundo o que preconiza a norma NBR5738-08 (ABNT, 2008b). Para cada proporção foram moldados 08 corpos de prova cilíndricos e 02 corpos de prova prismáticos, concomitantemente com 3 amostras (placas) de dimensões 200 x 200 x 30 mm para teste de permeabilidade de água.

Após o preparo do concreto, os moldes cilíndricos foram preenchidos por duas camadas do concreto, sendo que para cada camada foram despendidos 12 golpes com uma haste metálica a fim de compactar as misturas. O concreto permaneceu no molde por 24 horas, sendo então desmoldado e encaminhado para a cura por imersão em água durante 7 e 28 dias.

O adensamento do concreto nos moldes prismáticos foi realizado com dois intervalos de 10 quedas em mesa de adensamento da marca PAVITEST. O concreto permaneceu no molde por 24 horas, sendo então desmoldado e encaminhado para a cura em imersão em água 28 dias de acordo com a norma NBR5738-08 (ABNT, 2008b).

4.4.3 Determinação de densidade de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido - proporções dos concretos permeáveis

A densidade de massa aparente dos corpos de prova no estado fresco e no estado endurecido foi determinada de acordo com a norma NBR1328-05 (ABNT, 2005). A densidade aparente foi calculada por meio da Equação 10.

$$\rho_{max} = \frac{m}{v} \times 1000$$

Equação 10

Sendo ρ_{max} corresponde a densidade aparente no estado endurecido ou fresco, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; m corresponde a massa do corpo de prova, em g; v corresponde ao volume do corpo de prova, em cm^3 .

4.4.4 Determinação da Resistência à Compressão - Proporções dos Concretos Permeáveis

Três corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm (diâmetro x altura) foram submetidos aos testes de resistência à compressão após 7 e 28 dias de idade, de acordo com a norma NBR5739 – 07 (ABNT, 2007) em prensa de marca EMIC modelo PC 200I. A resistência à compressão foi calculada de acordo com a Equação 11.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo f_c corresponde à resistência à compressão, em MPa; F corresponde à carga máxima aplicada, em N e D corresponde ao diâmetro do corpo de prova, em mm.

4.4.5 Determinação da Resistência à Tração na Flexão - Proporções dos Concretos Permeáveis

Os corpos de prova, após cura em água por 28 dias, foram submetidos ao teste de resistência à tração na flexão, de acordo com a norma adaptada NBR 12142–10 (ABNT, 2010). Os testes foram realizados em uma máquina para ensaios de resistência à tração na flexão e de compressão marca EMIC, modelo PC200I.

A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 12.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo $f_{ct,f}$ a resistência a tração na flexão expressa em (MPa), F a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em (N), l é a dimensão do vão entre apoios, expressa em (mm), b a largura média do corpo de prova, expressa em (mm) e d^2 a altura média do corpo de prova, expressa em (mm).

4.4.6 Determinação do Módulo de Elasticidade - Proporções dos Concretos Permeáveis

Para três corpos de prova após desmoldados e curados em água por 28 dias foram submetidos ao teste de módulo de elasticidade, de acordo com a norma NBR 8522 – 03 (ABNT, 2003). O módulo de elasticidade foi realizado em um extensômetro eletrônico de configuração dupla para medição de pequenas deformações em corpos de prova rígidos, modelo EE08. O módulo de elasticidade é a medida da capacidade de deformação do concreto, sendo definida como uma relação entre a tensão (τ) e a deformação (ϵ). Os testes foram realizados na empresa Palavro Indústria de Artefatos de Concreto Ltda – Caxias do Sul – RS.

O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a Equação 13.

$$E_{ci} = 5600 \sqrt{f_{ck}(\text{MPa})} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo o módulo de elasticidade em (GPa) e f_{ck} a resistência à compressão em MPa.

4.4.7 Determinação do Índice de Vazios - Proporções dos Concretos Permeáveis

Determinou-se o índice de vazios para três corpos de prova moldados a massa ao ar e os mesmos foram mantidos em estufa marca QUIMIS à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. Foi determinada a massa da amostra seca, posteriormente a amostra foi imersa em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 72 h. Na etapa de saturação em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio d'água que foi progressivamente levado à ebulição, permanecendo nesta condição pelo tempo de 5 h. Após procedeu-se à pesagem em balança hidrostática adaptada no LABTEC/UCS. As amostras foram retiradas da água, secas e pesadas segundo NBR9778-09 (ABNT, 2005).

A relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total é calculada pela Equação 14.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 14}$$

Sendo M_{sat} = massa saturado em kg M_s = massa seco em estufa kg, M_i = massa saturado, imerso em água em kg.

4.4.8 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade - Proporções dos Concretos Permeáveis

As nove amostras de dimensões 200 x 200 x 30 mm das proporções CR, CP-50 e CP-100 foram submetidas ao teste de permeabilidade (percolação) da água (Figura 11), sendo a condição de partida da amostra, seca em estufa marca QUIMIS à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. O procedimento do que foi descrito no item 4.3.1

Este procedimento foi realizado em triplicata com as amostras em condições seca em estufa por 24h \pm 105°C e na condição saturada em água, adaptado da norma NBR NM 53-09 (ABNT, 2009).

O cálculo do coeficiente de permeabilidade (k) de água foi determinado pela Lei de Darcy (Equação 8, item 4.3.2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados da Caracterização das Matérias-Primas

O cimento utilizado tem como características, segundo fabricante (ANEXO 1), massa específica $2,73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, resistência à compressão após 3 dias de 17,9 MPa, após 7 dias de 22,9 MPa e após 28 dias de 35,6 MPa. Como ensaios químicos do Cimento CP IV-32, o fabricante destaca um percentual de $\text{CO}_2 \leq 30 \%$, 1,7% de SO_3 e 31,04% de resíduo insolúvel.

5.1.1 Caracterização Granulométrica dos Agregados do Agregado Natural e dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana

A caracterização granulométrica dos agregados naturais e dos agregados reciclados de RIP é apresentada na Tabela 5. Nesta são apresentadas as porcentagens retidas (Ret.) e as acumuladas (Acum.) do agregado miúdo (areia), a dimensão máxima característica e o módulo de finura, utilizado na proporção de concreto A550 com uma relação cimento/materiais secos de 1:5 e uma relação de água/cimento de 0,5 e na proporção de concreto B550 com uma relação cimento/ materiais secos de 1:5 e uma relação água/cimento de 0,5, do estudo exploratório, assim como dos agregados brita 0, brita 1 e RIP, ensaio realizado de acordo com a norma NBR 7211-09.

A finalidade do estudo granulométrico é verificar qual composição granulométrica pode promover o aumento da resistência dos concretos e argamassas. A norma NBR NM 248-03, que determina a composição granulométrica dos agregados para concreto, fixa limites de granulometria entre os quais deve estar compreendida a composição granulométrica de um agregado a ser empregado em concreto.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica dos agregados naturais e dos agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana

Peneira (mm)	Areia		Brita 19		Brita 12,5		RIP	
	(%)		(%)		(%)		(%)	
	Ret.*	Acum.	Ret.*	Acum.	Ret.*	Acum.	Ret.*	Acum.
19	0	0	0	0	1	1	3	3
12,5	0	0	0	0	62	63	16	19
9,5	0	0	0	0	27	90	9	28
6,3	0	0	30	30	10	100	15	43
4,75	0	0	40	70	0	100	8	51
2,4	1	1	30	100	0	100	17	68
1,2	3	4	0	100	0	100	10	78
0,6	17	21	0	100	0	100	8	86
0,3	40	61	0	100	0	100	5	91
0,15	26	87	0	100	0	100	3	94
Fundo	13	100	0	100	0	100	6	94
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
Dimensão Máxima	6,3		12,5		25		25	
Módulo de finura	1,74		5,64		6,91		5,0	

*Ret. = % das frações retidas; Acum. = % das frações acumuladas.

De acordo com a Figura 14 e considerando a distribuição granulométrica dos agregados miúdos (areia) e dos agregados graúdos (brita 0 e brita 1), verificou-se que a distribuição granulométrica do agregado reciclado de RIP contempla as duas faixas granulométricas de interesse (agregado graúdo e agregado miúdo), podendo ser utilizado em substituição tanto a areia quanto a brita. Desta forma, pelo método de cominuição (Gomes *et al.*, 2012), observou-se que as melhores opções de incorporação dos RIP seriam aquelas para a produção de artefatos que utilizassem os maiores tamanhos de partícula como agregados.

A incorporação do agregado reciclado de RIP, como matéria-prima, para a produção de concreto permeável é desejável já que para a produção deste concreto não se utiliza agregado miúdo (areia), sendo o concreto confeccionado preferencialmente com água, cimento e agregado graúdo, com dimensões de partículas que podem variar de 1,2–19 mm.

Após o processo de cominuição (Figura 14), os RIP apresentaram partículas com tamanhos variados, sendo as dimensões observadas de 2,4 a 19 mm.



Figura 14 - Resíduos de isoladores elétricos de porcelana (a) antes do processo de cominuição (b) antes do processo de cominuição com dimensões de partículas e (c) antes do processo de cominuição com dimensões de partículas.

De acordo com Gomes, (2012), aproximadamente 50% dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana obtidos da cominuição possuem um tamanho de partícula de 4,75 mm, retidos na peneira de número 4 *tyler mesh*, encontrando-se, portanto, no limite da classificação entre agregado graúdo e miúdo (Anexo2).

A partir da operação de cominuição utilizada neste estudo buscou-se utilizar dimensões de partícula de 12,5; 9,5; 6,3; 4,8 e 2,4 mm (4, 6, 9 e 10 *tyler mesh*) como agregados em concretos permeáveis.

Na Tabela 6 são apresentadas as porcentagens retidas (Ret.) e acumuladas (Acum.), a dimensão máxima característica e o módulo de finura, utilizadas em cada proporcionamento do estudo exploratório (A550, B550, C440, D440, E440 e F435), em ensaio realizado de acordo com a norma NBR 7211-05.

Na Tabela 7 são apresentadas as porcentagens retidas (Ret.) e acumuladas (Acum.) a dimensão máxima característica e o módulo de finura, utilizado nos proporcionamento dos concretos CR e CP-50 e CP-100, em ensaios realizados de acordo com a norma NBR7211-05.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos proporcionamentos no estudo exploratório dos concretos permeáveis.

Peneira (mm)	Proporcionamentos											
	A550 (%)		B550 (%)		C440 (%)		D440 (%)		E440 (%)		F435 (%)	
	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,5	0	0	25	25	0	0	25	25	20	20	25	25
9,5	25	25	25	50	25	25	25	50	20	40	25	50
6,3	25	50	25	75	25	50	25	75	20	60	25	75
4,75	25	75	25	100	25	75	25	100	20	80	25	100
2,4	25	100	0	100	25	100	0	100	20	100	0	100
1,2	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0,6	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0,3	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0,15	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0,075	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
Fundo	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Dimensão Máxima	12,50		19,00		12,50		19,00		19,00		19,00	
Módulo de finura	6,00		6,50		6,00		6,50		6,20		6,50	

*Ret. = % das frações retidas; Acum.= % das frações acumuladas.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica dos proporcionamentos dos concretos CR, CP-50 e CP-100.

Peneira (mm)	CR (%)		CP- 50 (%)		CP-100 (%)	
	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.	Ret.	Acum.
19	0	0	0	0	0	0
12,5	25	25	25	25	25	25
9,5	25	50	25	50	25	50
6,3	25	75	25	75	25	75
4,75	25	100	25	100	25	100
2,4	0	100	0	100	0	100
1,2	0	100	0	100	0	100
0,6	0	100	0	100	0	100
0,3	0	100	0	100	0	100
0,15	0	100	0	100	0	100
0,075	0	100	0	100	0	100
Fundo	0	100	0	100	0	100
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Dimensão Máxima	19,00		19,00		19,00	
Módulo de finura	6,50		6,50		6,50	

Ret. = % das frações retidas; Acum.= % das frações acumuladas.

5.1.2 Análise da Caracterização Física do Agregado Natural e dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana

O resultado da absorção de água do agregado brita foi de 3,05%. Em geral, as rochas usadas como agregado para concreto mostram valores de absorção baixos ($\cong 1\%$), enquanto que as mais porosas podem apresentar valores de absorção elevados, maiores que 3% (IBRACON, 2011).

O resultado do índice de forma pelo método do paquímetro do agregado brita foi de 1,9. Segundo a NBR 7809-08 os grãos de forma cúbica têm índice próximo de 1 e os grãos lamelares é considerado aceitável o limite de 3.

A Tabela 8 apresenta o resultado da massa específica, absorção de água e índice de forma pelo método do paquímetro para os agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana.

Tabela 8 - Resultado da caracterização dos agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana e a comparação com os parâmetros da literatura.

Ensaio	RIP	Parâmetros da literatura
Massa específica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) NBR NM52-09 (ABNT, 2009)	2400	2740 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ carapaças de moluscos marítimos (NGUYEN <i>et al.</i> , 2013); 2600 a 2700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para granito, 2550 a 2700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para gnaisse, 2750 a 2950 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para basalto e 2600 a 2800 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para calcário, (IBRACON,2011).
Absorção de água (%) NBR NM 53-09 (ABNT, 2009)	0,34	0,1 a 0,8% granito e quartzito, 1,2 a 8,5% arenito (IBRACON, 2011; MEHTA, P. K. & MONTEIRO, 2000); 0,38% carapaças de moluscos marítimos (NGUYEN <i>et al.</i> , 2013).
Índice de forma NBR7809-08 (ABNT, 2008)	2,6	grãos de forma cúbica, terão índice próximo de 1; os grãos lamelares, considerado aceitável o limite de 3 NBR 7809-08 (ABNT, 2008).

O método de medida de absorção de água permite quantificar a água que pode preencher os poros comunicantes nos grãos de uma massa de agregados (ABNT, 2009). Segundo Bhutta *et al.*, (2013), a alta absorção de água do agregado reciclado pode resultar na diminuição do teor de água na mistura do concreto. Isso pode afetar significativamente a mistura resultando em um concreto com baixa resistência. Segundo Campos, (2009), os resíduos de isoladores elétricos de porcelana possuem uma absorção baixa, entretanto, a absorção é explicada pelo método de moagem, esta porcelana fica com microfissuras, por onde a água é absorvida.

A forma dos grãos, no caso dos agregados naturais e das partículas ou fragmentos que compõem os demais tipos de agregados para concreto influenciam nas propriedades desse, no estado fresco. Comparando-se as partículas arredondadas e lisas com as angulosas ou angulosas e ásperas, geralmente há necessidade de aumentar a quantidade de pasta de cimento nos concretos o que elevaria o seu custo de produção (IBRACON, 2011).

Os resultados da caracterização dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana estão de acordo com os valores indicados na literatura para utilização como agregado em substituição aos agregados naturais (brita e areia) considerando características como à massa específica, absorção de água e índice de forma.

5.2 Incorporação dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis - Resultado do Estudo Exploratório

5.2.1 Relação Água/Cimento (a/c) - Resultado do Estudo Exploratório

As Figuras de 15 a 20 ilustram o aspecto da parte superior e da parte inferior das placas resultantes das seis proporções, desenvolvidas no estudo exploratório, para posterior definição dos parâmetros para o proporcionamento referência (CR).

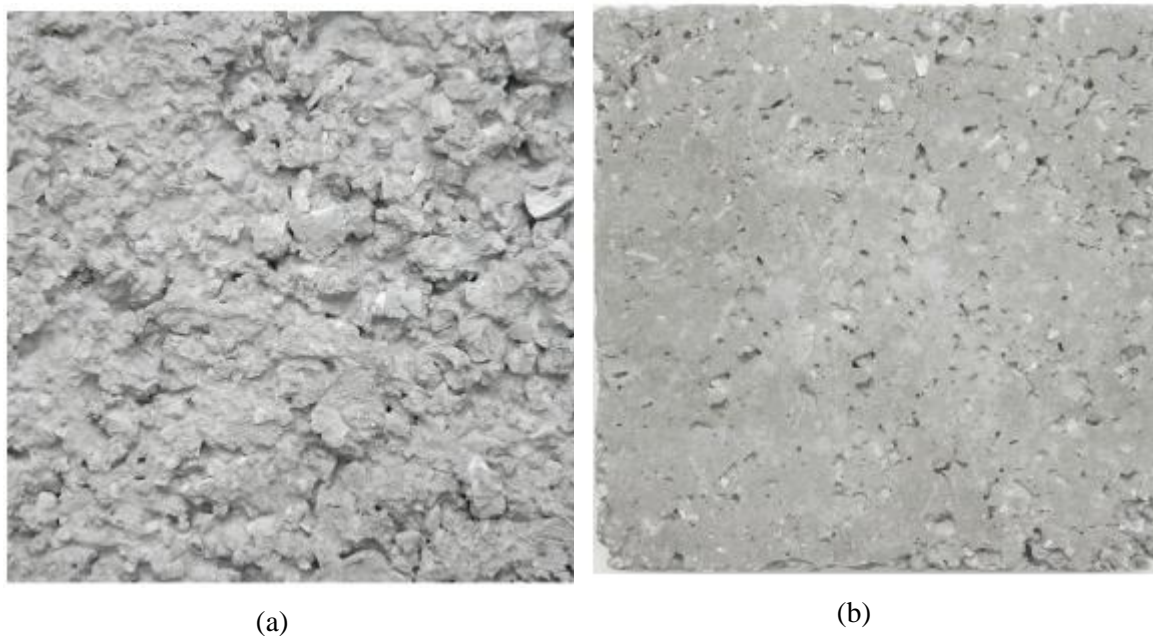


Figura 15 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório A550, (a) parte superior e (b) inferior.

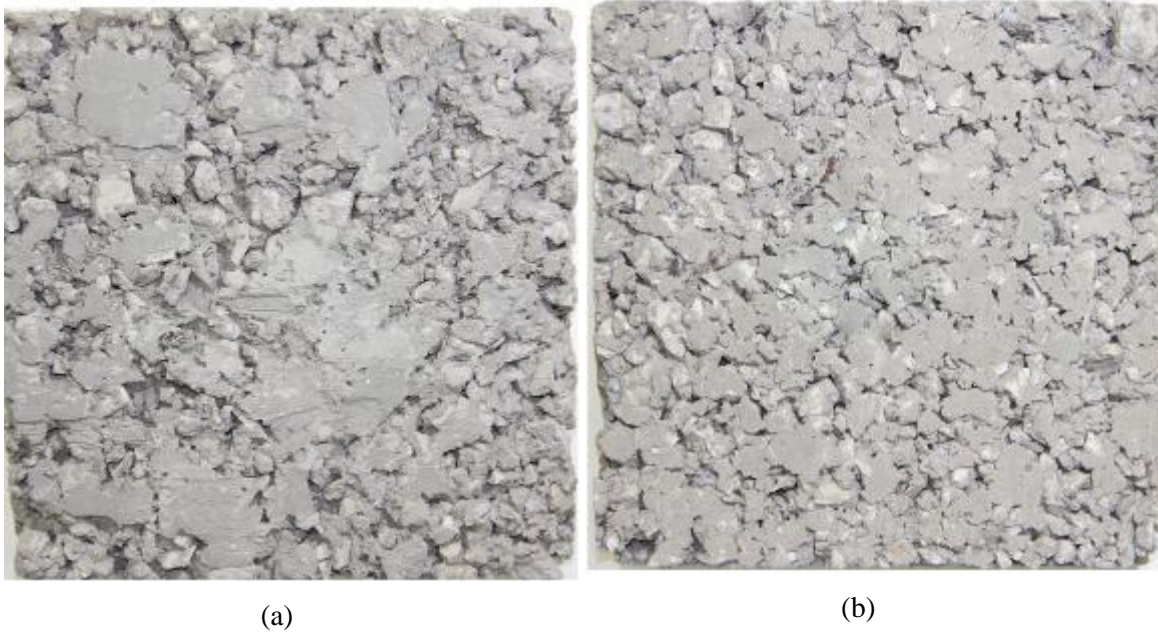


Figura 16 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório B550, (a) parte superior e (b) inferior.

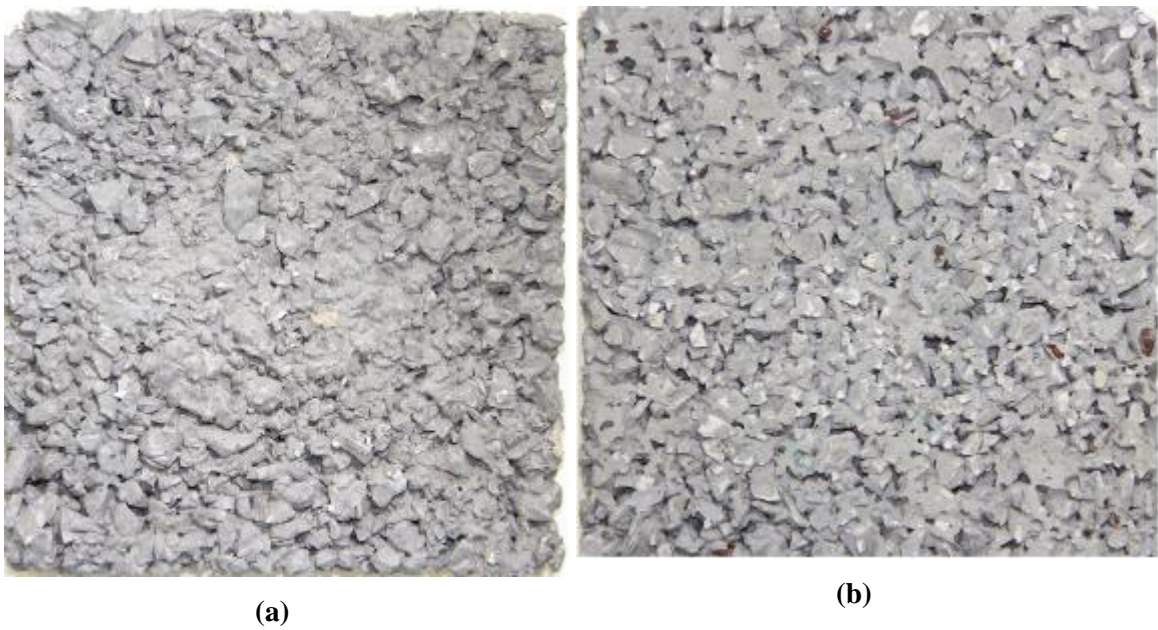


Figura 17 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório C440, (a) parte superior e (b) inferior.

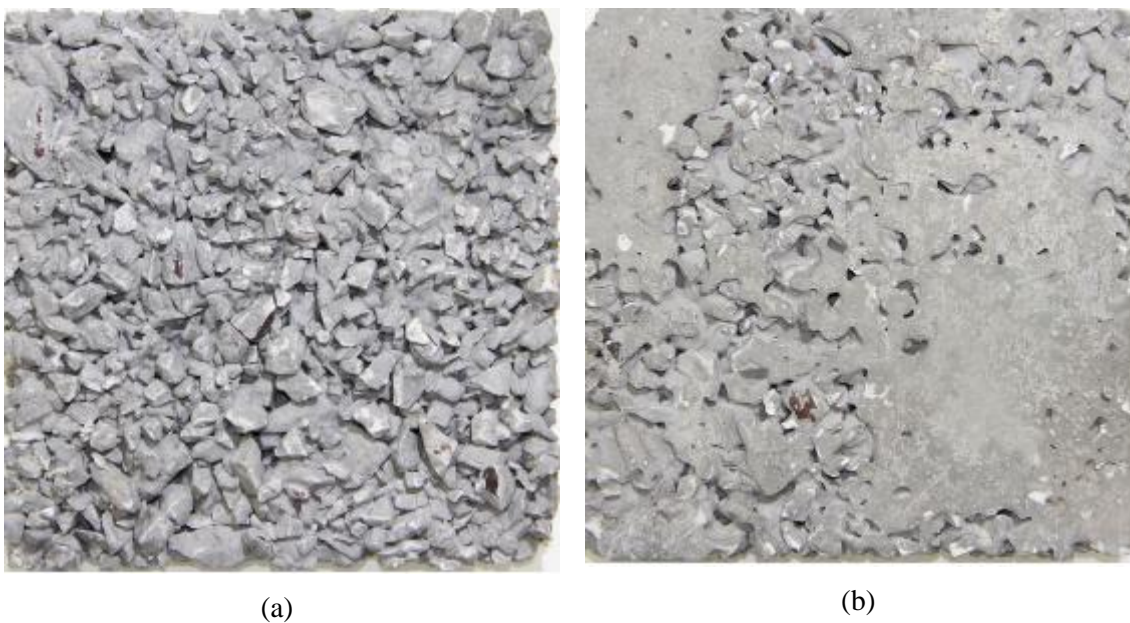


Figura 18 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório D440, (a) parte superior e (b) inferior.

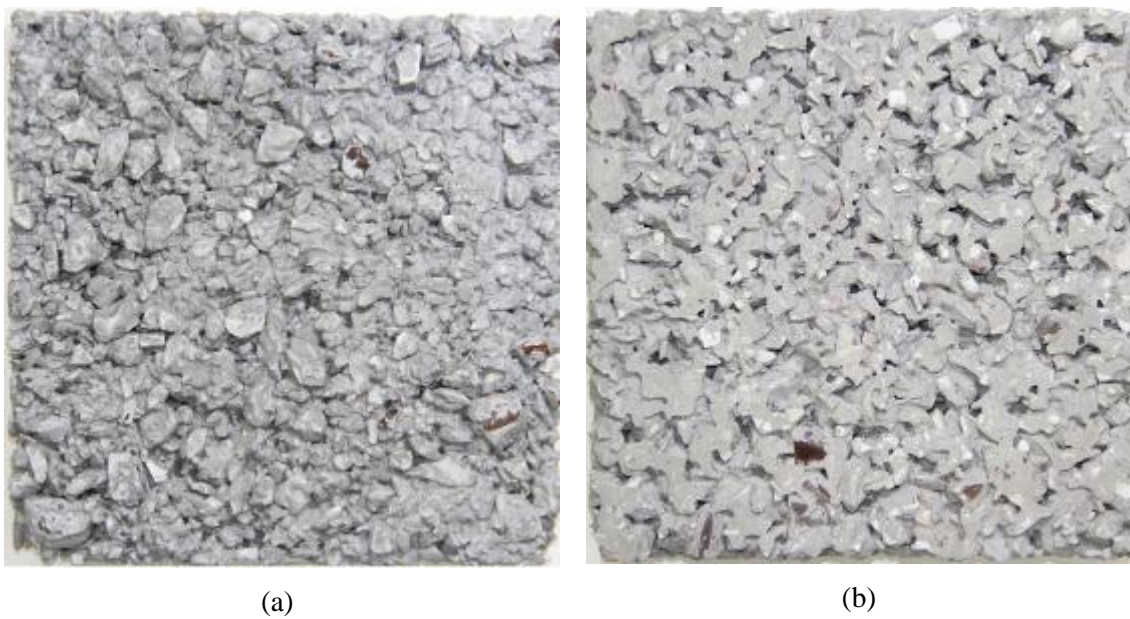


Figura 19 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório E440, (a) parte superior e (b) inferior.

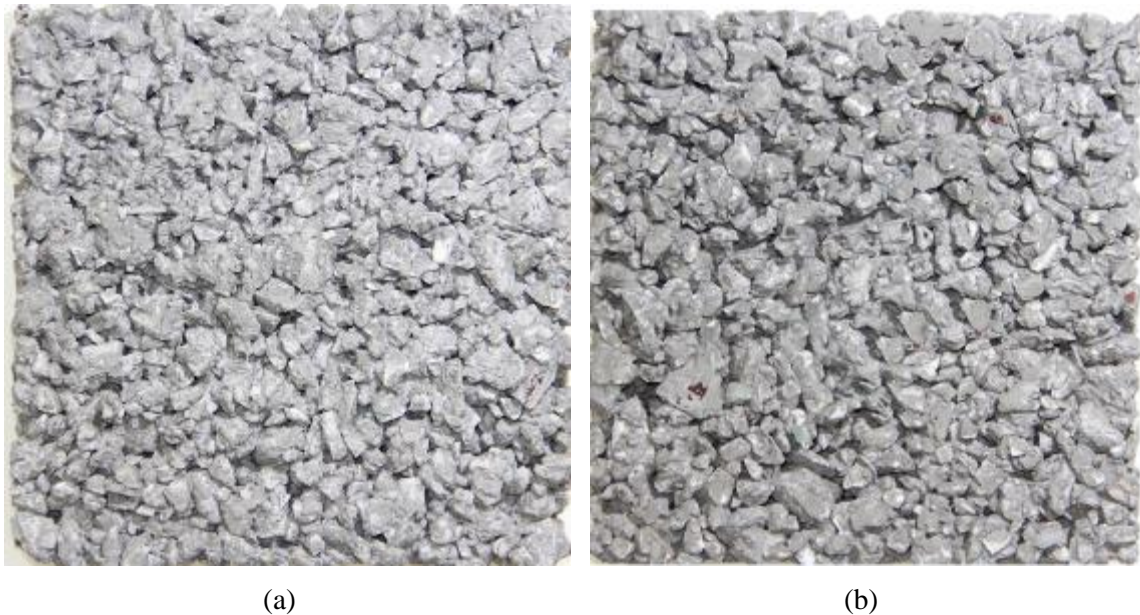


Figura 20 - Imagens das placas da proporção de concreto do estudo exploratório F435, (a) parte superior e (b) inferior.

Constata-se pelas imagens das Figuras de 15 A 18 que as amostras A550, B550, C440 e D440 do estudo exploratório apresentaram excesso de pasta de cimento (mistura de água e cimento) na parte inferior. A baixa absorção de água dos agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana, associada à relação de água/cimento de 0,5 e 0,4, resultou na argamassa dos traços A550 e B550 e a pasta de cimento dos traços C440 e D440 mais fluida, escoando e acomodando-se na parte inferior da placa, comprometendo a conectividade dos poros, obstruindo-os. Segundo Zaetang *et al.*, (2013), diante de constatação semelhante a deste estudo, justificaram que a ligação entre os poros reduzia com o aumento do teor de argamassa e consequentemente da pasta de cimento.

Quando o agregado de menor tamanho (2,4 mm) foi introduzido no proporcionamento E440 (Figura 19), embora com o teor de pasta de cimento de 20% e a/c de 0,4, a conectividade dos poros diminuiu. Levando-se em conta a influência da relação água/cimento nas propriedades do concreto, a relação foi ajustada no traço F435 para 0,35. Observou-se que o traço F435 (Figura 20) apresentou melhor conectividade

de poros com a diminuição da relação a/c, a água promoveu a aglutinação do agregado por intermédio da pasta de cimento, fornecendo coesão e compacidade ao concreto.

5.2.2 Coeficiente de permeabilidade - Resultado do Estudo Exploratório

Os resultados do coeficiente de permeabilidade (k), determinados pela Lei de Darcy (Equação 8) para os seis proporcionamentos do estudo exploratório, são apresentados na Figura 21.

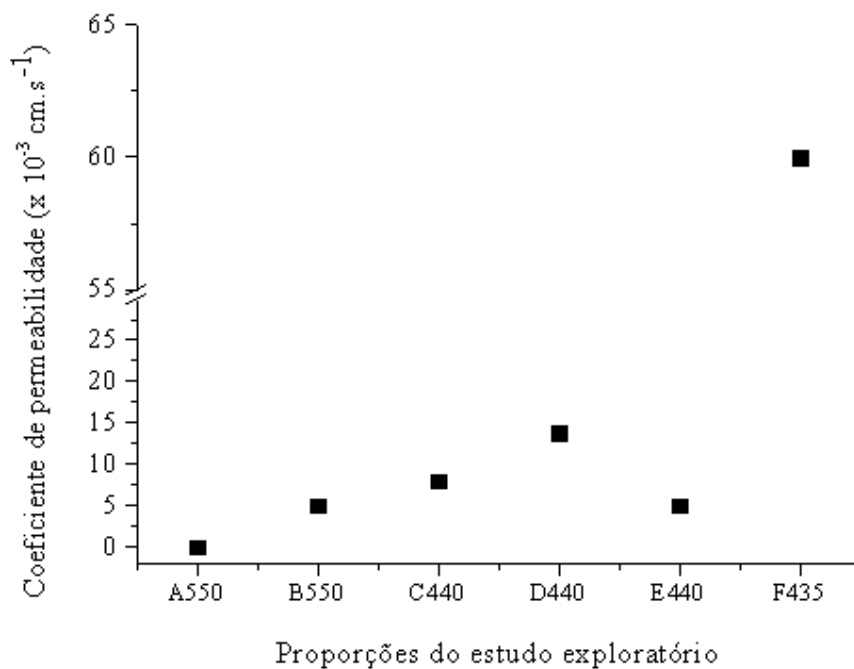


Figura 21 - Resultados do coeficiente de permeabilidade do estudo exploratório.

Os valores de k para concretos permeáveis segundo Neithalath *et al.*, (2006) eram da ordem de 0,1 a 0,01 cm.s^{-1} . Com exceção do proporcionamento A550, B550 e E440 os demais proporcionamentos apresentarem valores superiores de coeficiente de permeabilidade. A permeabilidade do proporcionamento A550 foi afetada pelo maior

teor de argamassa (40%) e dimensões de partículas menores (9,5 – 2,4 mm), diminuindo desta forma, os espaços vazios da placa.

O proporcionamento E440 apresentou diminuição no valor de permeabilidade a água, consequência da incorporação de agregado RIP de dimensões menores (12,5 – 2,4 mm). Para os proporcionamentos C440 e F435 os coeficientes de permeabilidade à água de $1,38 \times 10^{-2} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $6 \times 10^{-2} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente, valores estes, superiores aos de Neithalath *et al.*, (2006). Este aumento do coeficiente de permeabilidade de água foi atribuído a dimensões de partículas maiores e teores de pasta de cimento menores.

5.2.3 Relação Cimento/Materiais Secos (1/m) - Resultado do Estudo Exploratório

Diante dos dois valores primeiramente testados para a relação cimento/materiais secos de, 1:5 e 1:4 e das características tais como, maior interconectividade dos poros, menor quantidade de pasta na parte inferior das placas e maior coeficiente de permeabilidade, o melhor resultado obtido em termos de 1: m foi para o proporcionamento F435, relação cimento/materiais secos de 1: 4.

Os parâmetros de água/cimento, teor de pasta de cimento (%), coeficiente de permeabilidade de água (k) e cimento/materiais secos para o proporcionamento referência foram definidos considerando os resultados do proporcionamentos F435.

5.3 Resultado da Incorporação dos Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos Permeáveis – Referência, 50 e 100% em Massa de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana

5.3.1 Avaliação da Massa Unitária - Referência, 50 e 100% de RIP

A Tabela 9 apresenta os resultados da massa unitária dos concretos permeáveis CR, CP – 50 e CP–100.

Tabela 9 - Massa unitária dos concretos permeáveis

Código das proporções	Massa Unitária (kg·m ⁻³)
CR	1451,2
CP-50	1377,70
CP-100	1287,08

Segundo Mehta e Monteiro, (2000) e Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2011) a maioria dos agregados naturais, tais como areia e pedregulho, apresenta massa unitária entre 1300 e 1750 kg·m⁻³ e produzem concretos normais (concretos executados com agregados de areias quartizosas, britas graníticas).

Os resultados da massa unitária para a proporção de concreto permeável CR de 1451,2 kg·m⁻³ e das demais proporções, CP – 50 e CP – 100 de 1377,70 e 1287,08 kg·m⁻³ estão dentro dos valores recomendados pela literatura e podem ser utilizados em concretos.

5.3.2 Avaliação do Abatimento de Tronco de Cone – Referência, 50 e 100% RIP

Este ensaio tem como objetivo verificar a uniformidade do abatimento entre uma remessa e outra do concreto. A Tabela 10 apresenta os resultados do abatimento de tronco de cone dos concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100.

Tabela 10 - Valores da avaliação do abatimento de tronco de cone

Ensaio	CR	CP- 50	CP-100
Abatimento de tronco de cone (mm)	10	17	20

Observou-se que os proporcionamentos CP-50 e CP-100, sendo substituído 50 e 100%, em massa, dos agregados graúdos naturais por RIP, apresentaram um aumento de abatimento de tronco de cone em relação ao proporcionamento referência CR. O aumento do abatimento de tronco de cone devido a incorporação do RIP é atribuído a sua baixa absorção de água (0,34%) em relação ao agregado natural brita (3,05%).

Como o concreto permeável tipicamente apresenta abatimento de tronco de cone zero, segundo as recomendações ACI 211 3R-02, os resultados de abatimento de tronco de cone deste estudo são considerados positivos, pois, os concretos apresentaram trabalhabilidade ao se tratar de concreto permeável. Segundo Nguyen *et al.*, 2013 os valores de abatimento de tronco de cone baixos são atribuídos a alta consistência do concreto no estado fresco, uma vez que contêm menos água e pasta de cimento. Esta característica segundo os autores o torna adequado para a produção de pré-fabricados como pavimentos.

A Figura 22 mostra o resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone realizado com o proporcionamento CR.



Figura 22 - Resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone de cone do CR
(Fonte: o autor).

5.3.3 Determinação da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco e no Estado Endurecido – Referência, 50 e 100% em RIP

As densidades de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido, determinadas para as proporções de concretos CR, CP-50 e CP-100 são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Densidades de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido

Ensaio ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	CR	PC- 50	PC-100
Densidade de massa aparente no estado fresco	1830	1780	1700
Densidade de massa aparente no estado endurecido	1710	1700	1630

Os resultados de densidade de massa aparente dos concretos permeáveis (Tabela11) encontram-se dentro da faixa recomendada pela literatura que é de 1600 a

2000 kg·m⁻³ para concretos permeáveis (NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010).

O menor valor de densidade de massa aparente tanto no estado fresco como no endurecido foi o do concreto permeável CP-100 (1630 kg·m⁻³), de proporção 100% em massa de resíduos de isoladores elétricos de porcelana este valor é atribuído a menor massa específica (2400 kg·m⁻³) que os resíduos de isoladores elétricos de porcelana possuem ao ser, por exemplo, comparados com agregados naturais tais como barita (minério de bário), hematita (minério de ferro) de massa específica >2080kg/m³ e que produzem os concretos chamados de pesados.

A diminuição da densidade aparente dos proporcionamentos com a incorporação dos agregados reciclados de RIP indica que, as dimensões de partículas mais grosseiras dificulta o empacotamento das partículas do concreto (VIEIRA *et al.*, 2009).

Segundo Gomes, (2012) a redução da densidade, de maneira geral, reduz as propriedades mecânicas do material. Um melhor empacotamento das partículas é obtido quando os sólidos particulados finos preenchem os espaços vazios entre as partículas maiores (GOMES, 2012);

Como a incorporação de agregados reciclados de RIP em concreto permeável ainda não foi descrita pela literatura, não foi possível comparar os valores de densidade aparente no estado fresco e no estado endurecido com outros autores.

5.3.4 Determinação da Resistência à Compressão – Referência, 50 e 100% RIP

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise estatística do efeito dos proporcionamentos na resistência à compressão das amostras de concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100 rompidos aos 7 e 28 dias de idade. Para esta análise estatística foi utilizado o programa Statistic 7.0.

Tabela 12 - Resultados da análise estatística do efeito dos proporcionamentos na resistência à compressão das amostras CR, CP-50 e CP-100.

7 dias de idade						
	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	Fator F	Valor p	Variância significava
Proporcionamento	41,1339	2	20,5670	5,3271	0,102987	Não
Erro	11,5825	3	3,8608			
28 dias de idade						
Proporcionamento	20,8662	2	10,4331	7,8416	0,064344	Não
Erro	3,9915	3	1,3305			

A Figura 23 apresenta as médias das resistências à compressão das amostras dos proporcionamentos CR, CP-50 e CP-100 rompidos aos 7 e 28 dias de idade.

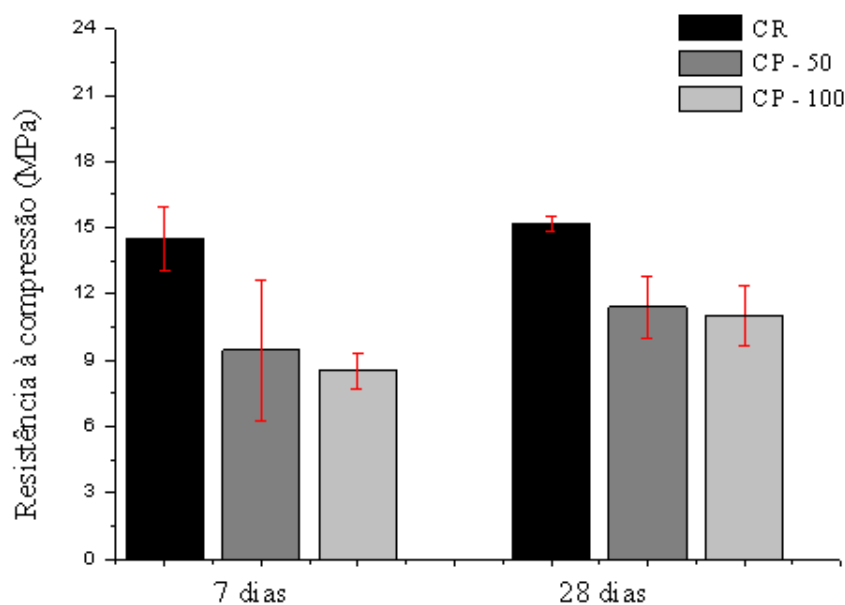


Figura 23 - Resistência à compressão das amostras CR, CP – 50 e CP – 100 após 7 e 28 dias de idade.

Considerando os resultados da análise estatística, o efeito dos proporcionamentos na resistência à compressão (Tabela 12) para as amostras de concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100 (7 e 28 dias de idade) não foi significativo.

As baixas resistências à compressão dos proporcionamentos CR, CP-50 e CP-100, foram atribuídas à baixa relação a/c e a dimensões de partícula maiores (12,5–4,8 mm), que resulta em uma matriz de concreto frágil. Outro fator que resulta em uma matriz de concreto mais frágil é a baixa aderência entre os resíduos de isoladores elétricos de porcelana e a pasta de cimento no concreto. O formato lamelar que a porcelana adquire ao ser moída e sua grande área vidrada também interferiram na aderência da pasta de cimento do concreto.

Durante os ensaios foi observado o desprendimento da pasta de cimento do RIP, segundo Campos, (2009) este fato pode ser explicado pela baixa absorção de água pelo resíduo de isolador elétrico de porcelana. A água (água de amassamento) envolta no resíduo não é absorvida pelo agregado, ao evaporar cria vazios entre a pasta de cimento e o agregado, principalmente nos resíduos com faces vidradas (esmalte). Contudo, segundo ACI 522R, os resultados obtidos neste estudo apresentaram resistência à compressão adequada para aplicação em concreto permeável demonstrando que é possível utilizar resíduos de isoladores elétricos de porcelana, cominuídos, em substituição a agregados graúdos, sem perda de propriedades mecânicas para aplicação em concretos permeáveis.

A incorporação de agregados reciclados de RIP em concreto permeável ainda não foi descrita pela literatura, desta forma não foi possível comparar os valores de resistência à compressão com outros autores.

5.3.5 Determinação da Resistência à Tração na Flexão – Referência, 50 e 100% em RIP

A Figura 24 apresenta a amostra do concreto permeável referência no molde prismático com idade de 28 dias sob tração na flexão.



Figura 24 - Resistência à tração na flexão do concreto permeável referência em molde prismático com 28 dias de idade (Fonte: o autor).

A Figura 25 ilustra a seção da fratura da amostra CR (no ensaio de tração na flexão), por fotografia.

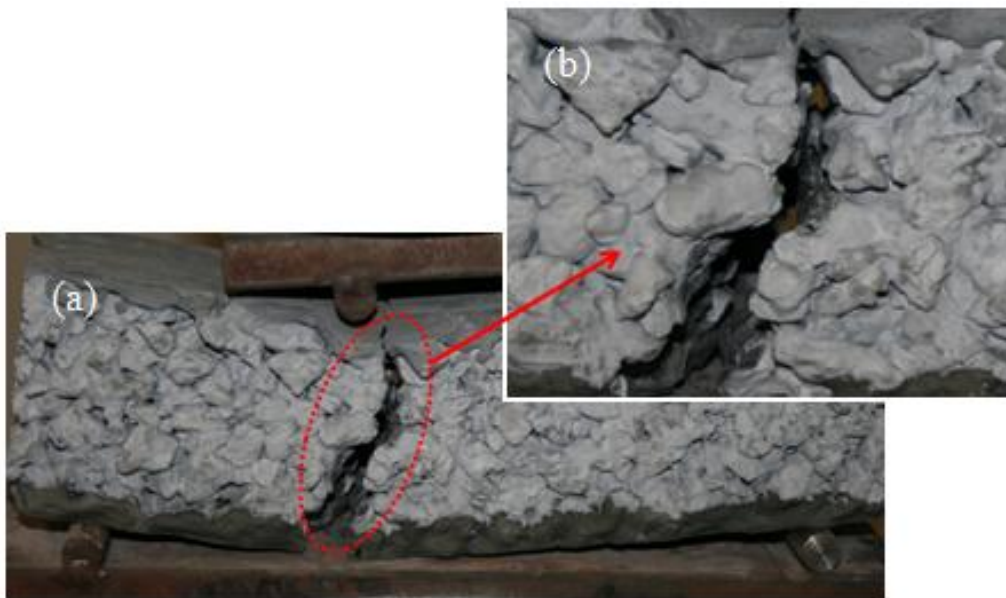


Figura 25 - Imagens da zona de fratura da amostra CR (no ensaio de tração na flexão), obtidas por (a) e (b) fotografia (Fonte: o autor).

A fratura ocorreu no poro próximo à zona de interface pasta/agregado devido à menor quantidade desta pasta que envolve os grãos de brita nos concretos permeáveis.

A fratura ocorreu claramente na região próxima à zona de interface pasta/agregado evidenciando ser claramente este o ponto mais frágil da ligação em concretos permeáveis (Figura 25b).

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com amostras aos 28 dias de idade. A Figura 26 apresenta as médias das resistências à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos das amostras CR, CP-50 e CP-100 rompidos com 28 dias de idade.

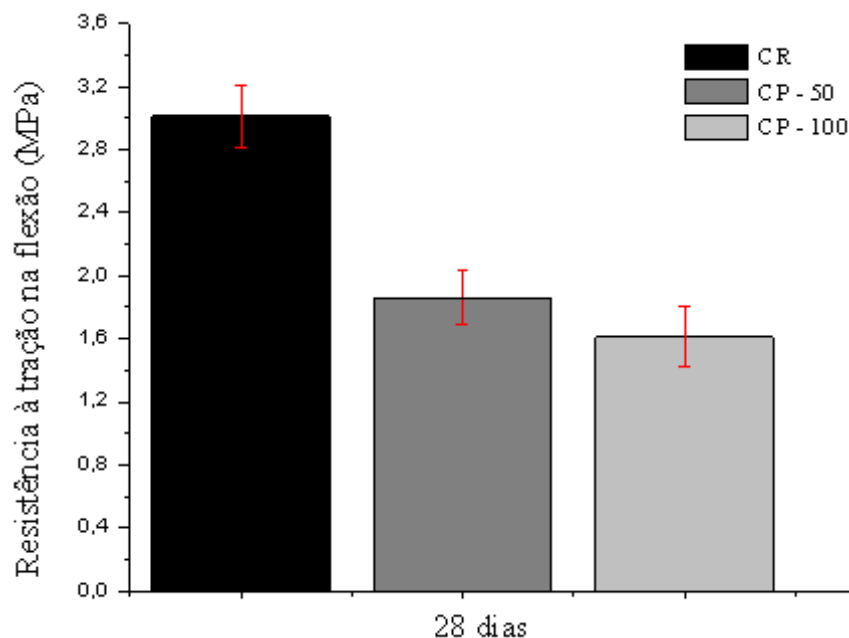


Figura 26 - Resistência à tração na flexão das amostras de concretos permeáveis moldes prismáticos aos 28 dias de idade.

O valor da resistência à tração na flexão foi de 3,01 MPa para CR, de 1,86 MPa para CP-50 e de 1,61 MPa para CP-100. Nguyen *et al.*, 2013, afirmam que, quanto maior for o tamanho (dimensão) dos agregados incorporados ao concreto, menor é a resistência à tração na flexão e conseqüentemente à compressão.

5.3.6 Determinação do Módulo de Elasticidade – Referência, 50 e 100% em RIP

A Figura 27 mostra os resultados do módulo de elasticidade dos concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100.

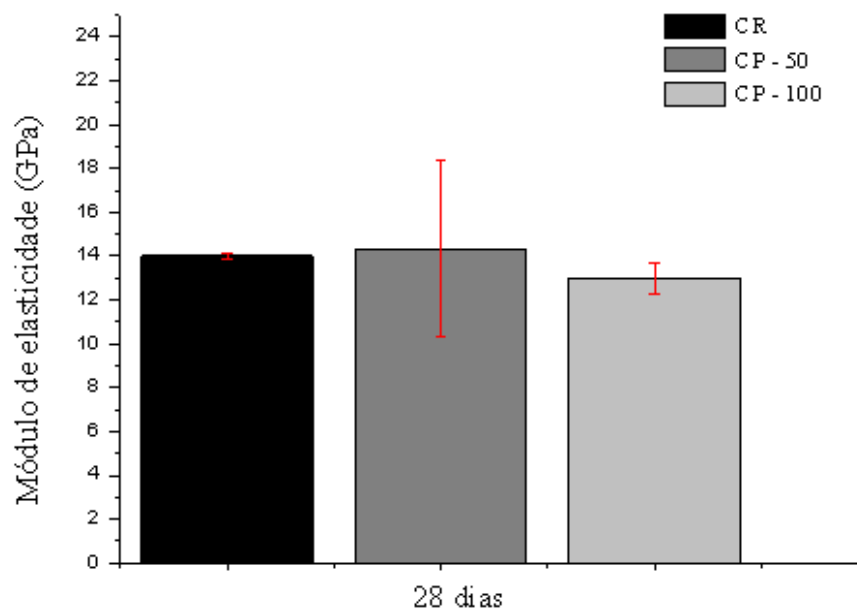


Figura 27 - Módulo de elasticidade dos concretos CR, CP – 50, CP – 100 após 28 dias de idade.

A Tabela 13 apresenta o resultado da análise estatística do efeito dos proporcionamentos no módulo de elasticidade das amostras de concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100 rompidos aos 28 dias de idade.

Tabela 13 - Resultado da análise estatística do efeito dos proporcionamentos no módulo de elasticidade das amostras CR, CP-50 e CP-100.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	Fator F	Valor p	Variância significava
Proporcionamento	1,213	2	0,607	0,0983	0,909203	Não
Erro	18,520	3	6,173			

O emprego do RIP nos concretos permeáveis CP-50 e CP-100 não promoveu variância significativa no módulo de elasticidade (Figura 27) após 28 dias de idade quando comparado ao concreto permeável CR.

Os valores do módulo de elasticidade de 14,35 GPa para CP-50 e de 13,0 GPa para CP-100 pode ser atribuído à natureza rígida, maior dureza dos resíduos de isoladores cerâmicos, fruto de sua composição química e sua baixa porosidade (ZIMMERMANN *et al.*, 2013). Com base nestas análises é importante salientar que o tipo de resíduo empregado no concreto como agregado, e suas características, não influenciaram na propriedade analisada.

5.3.7 Determinação do Índice de Vazios – Referência, 50 e 100% em RIP

A Tabela 14 apresenta os resultados de índice de vazios para os concretos permeáveis CR, CP – 50 e CP 100.

Tabela 14 - Resultados do índice de vazios dos concretos permeáveis CR, CP-50 e CP-100

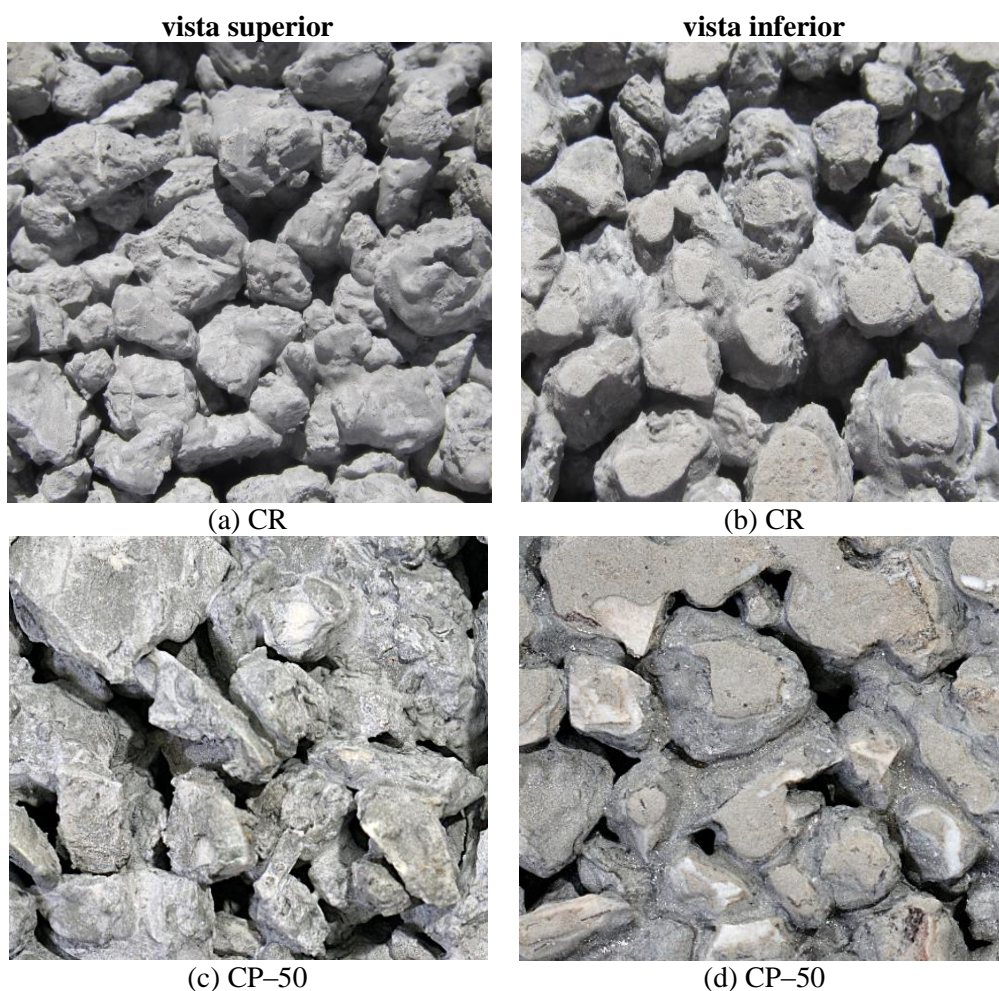
Ensaio	CR	CP-50	CP-100
Índice de Vazios (%)	18	14	12,5

A Figura 28 ilustra o aspecto visual das placas de concretos permeáveis desenvolvidas neste estudo.

Quando o agregado natural brita é substituído pelos resíduos de isoladores elétricos de porcelana, os valores do índice de vazios diminuem (Tabela 14). Esta queda no valor do índice de vazios é atribuída aos valores de absorção de água por parte dos agregados envolvidos. Os resíduos de isoladores elétricos de porcelana possuem baixa absorção de água (0,34%) quando comparados ao agregado natural (3,05%). O agregado

natural absorve água, cerca de 10 vezes mais que o RIP, influenciando no resultado do cálculo do índice de vazios segundo o que preconiza a norma NBR 9778 – 09, Equação 14, que estabelece a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total de poros, determinado a partir da massa da amostra seca, amostra imersa em água durante 72 h que posteriormente é levada à fervura durante 5h.

O valor do índice de vazios observados na Figura 28 para o concreto permeável referência de 18% está dentro da faixa recomendada pelo ACI 522R para concretos permeáveis que é de 15 a 25% de vazios.



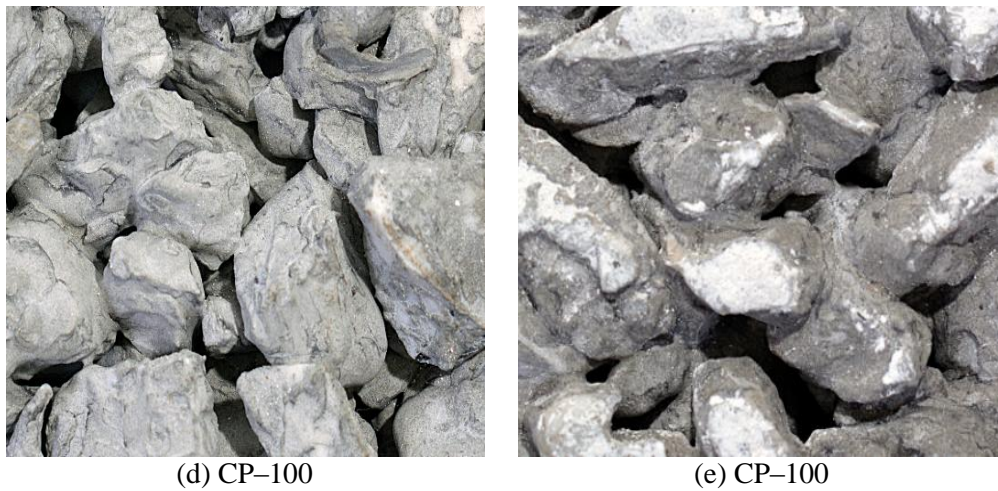


Figura 28 - Aspecto visual das placas de concretos, (a) CR vista superior, (b) CR vista da parte de baixo; (c) CP – 50 vista superior, (d) CP-50 vista da parte de baixo e (e) CP-100 vista superior, (f) CP-100 vista da parte de baixo.

A Figura 29 relaciona a densidade de massa aparente no estado endurecido dos concretos CR, CP-50 e CP-100 e o índice de vazios.

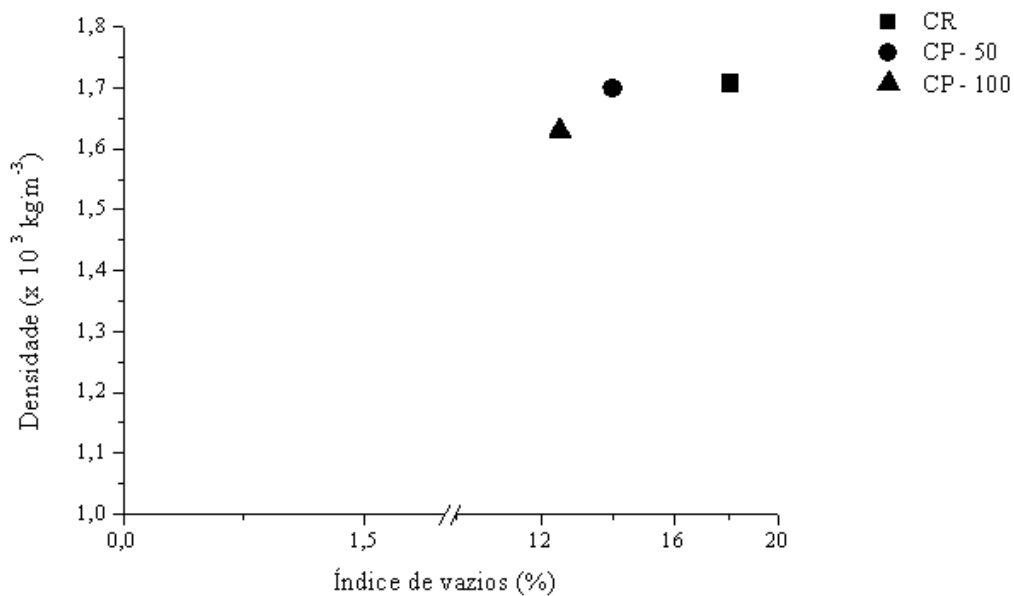


Figura 29 - Densidade e índice de vazios das proporções de concretos permeáveis.

Sabe-se que a densidade do concreto permeável depende das propriedades (massa específica, massa unitária, absorção de água) e das proporções dos materiais

utilizados em sua aplicação e é atribuída a presença de vazios, isto é, quanto menor a densidade dos concretos permeáveis, maior será o valor do índice de vazios (HUFFMAN, 2005; SATA *et al.*, 2013). Esta relação não foi observada nos concretos CP-50 e CP-100. Os valores de densidade dos concretos permeáveis CP-50 e CP-100 estão dentro dos valores recomendados pela literatura (ver seção 5.4.3).

5.3.8 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade – Referência, 50 e 100% de RIP

Os resultados do coeficiente de permeabilidade (k), determinados pela Lei de Darcy (Equação 8) na condição de amostra seca em estufa por $24h \pm 105^\circ C$ e na condição de amostra saturada em água, adaptado da norma NBR NM52-09 para as três proporções de concretos permeáveis, são apresentados na Figura 30.

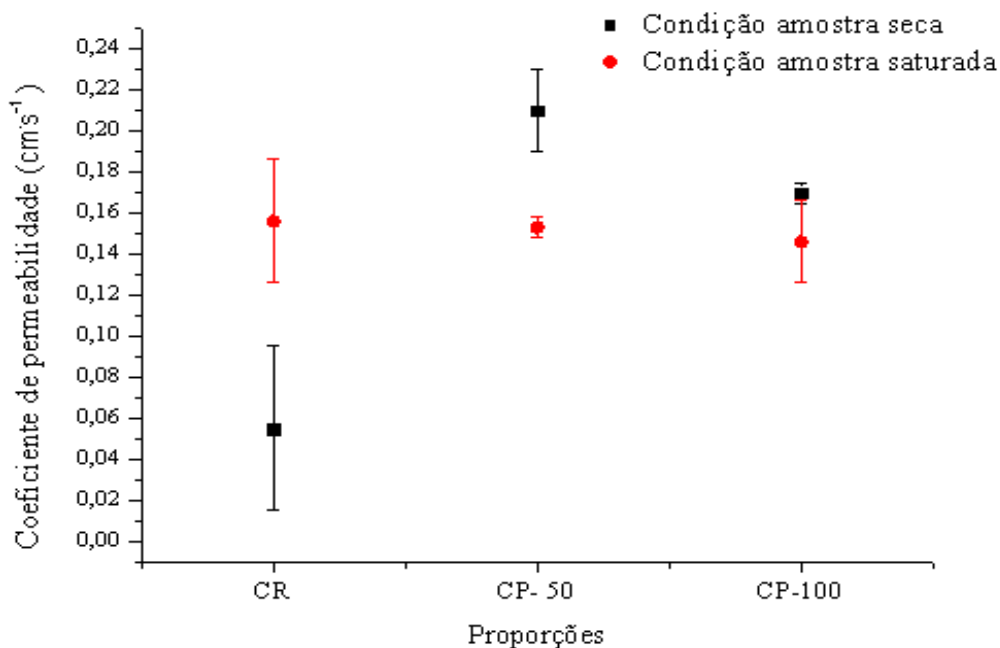


Figura 30 - Coeficiente de permeabilidade das proporções de concretos na condição amostra seca e saturada.

A Tabela 15 apresenta os resultados da análise estatística do efeito dos proporcionamentos CR, CP-50 e CP-100 e das condições de amostra saturada e seca sobre o coeficiente de permeabilidade.

Tabela 15 - Resultado da análise estatística do efeito dos proporcionamentos CR, CP-50 e CP-100 e das condições de amostra saturada e seca sobre o coeficiente de permeabilidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	Fator F	Valor p	Variância significava
Proporcionamento	0,020060	2	0,010030	14,3625	0,000655	SIM
Condição da amostra	0,000024	1	0,00024	0,0344	0,855920	NÃO
Proporcionamento <i>versus</i> condição da amostra	0,22938	2	0,11469	16,4231	0,000367	SIM
Erro	0,008380	12	0,000698			

O efeito cruzado (Tabela 15) entre as condições de amostra seca e saturada existe. O concreto referência apresenta uma diferença estatística significativa de coeficiente de permeabilidade da condição amostra seca para amostra saturada, uma vez que a porosidade dos grãos de brita absorvem uma quantidade de água superior a absorção de água dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana.

A proporção CP-50 proporcionou uma curva de empacotamento mais favorável para a criação de uma rede de poros mais interconectada, e consequentemente favorável à percolação de água pelas amostras.

A condição de amostra saturada de todos os proporcionamentos não revelaram diferenças significativas de coeficiente de permeabilidade à medida que se variou as proporções dos materiais.

Os resultados da medição do coeficiente de permeabilidade obtidos com o sistema proposto neste estudo para a medição do coeficiente de permeabilidade

empregando o método de carga variável (Figuras 11 e 12), e calculado a partir da Equação 8, estão dentro da faixa de resultados previstos pela literatura (Quadro 1) para coeficiente de permeabilidade.

6 CONCLUSÕES

Este estudo tem como objetivo produzir e caracterizar concretos permeáveis com o emprego de resíduos de isoladores elétricos de porcelana, cominuídos, em substituição a matérias-primas de fontes não renováveis e as principais conclusões encontram-se a seguir apresentadas.

- A granulométrica, o índice de forma, a massa específica e absorção de água dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana cominuídos, deste desenvolvimento, encontram-se dentro dos valores indicados pela literatura para aplicação em concretos permeáveis;

- No estudo exploratório, os parâmetros alterados da composição possibilitaram a fixação de valores de coeficiente de permeabilidade de água de $0,16 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, água/cimento de 0,35 e cimento/ materiais secos de 1:4, mais evidente no proporcionamento F435.

- O índice de vazios dos concretos permeáveis com a incorporação de 50 e 100% em massa de resíduos de isoladores elétricos de porcelana (14 e 12,5% para 50 e 100% em massa respectivamente) mostraram-se inferiores quando comparados ao concreto permeável referência (18,2%), atribuído a baixa absorção de água dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana influenciando no cálculo;

- As propriedades de resistência mecânica dos proporcionamentos referência, 50 e 100% em massa de resíduos de isoladores elétricos de porcelana são adequadas para aplicação em concretos permeáveis.

- Com relação à predição do coeficiente de permeabilidade da água dos concretos com resíduo de isoladores elétricos de porcelana com 50e 100% em massa de os valores obtidos ficaram entre $0,05$ a $0,2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ na condição amostra seca e $0,14$ a

0,15 cm·s⁻¹ na condição amostra saturada e, portanto, adequados para a aplicação em concretos permeáveis. Na condição saturada, conclui-se que o coeficiente de permeabilidade de todos os proporcionamentos não revelaram diferenças significativas de coeficiente de permeabilidade à medida que se variou as proporções dos materiais, pois independem da capacidade de absorção de água dos agregados.

Por fim, conclui-se que os resultados obtidos neste estudo demonstram a potencialidade do emprego de resíduos de isoladores elétricos de porcelana em substituição a agregados graúdos naturais (brita) em concretos permeáveis, tornando o desenvolvimento proposto uma solução sustentável para a fabricação de artefatos que empregando resíduos de fontes não renováveis, estando a proposta deste estudo de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

REFERÊNCIAS

- ACI 211.3R – 2 Guide for Selecting Proportions for No – Slump Concrete, 2002.
- ACI 522R-06, Pervious Concrete, American Concrete Institute Committee, 2006.
- ALBANO, C., CAMANCHO, N., HERNANDEZ, M., GUTIERREZ, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management. Composites**: v.29, p.2707-2716, 2009.
- ALCIONE, P. G.C.; RENAN, C. T.; LEANDRO, J.; ALBERTINA, X.R. C.; CLAUDEMIR, M. R. Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. **Waste Management. Composites**: v.32, p. 153–157, 2012.
- AGAR-OZBEK A.S., WEERHEIJM J., SCHLANGEN E., VAN BREUGEL K. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales **Construction and Building Materials. Composites**: v.41 2013, p.480-490, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. Métodos de fabricação de porcelana. Disponível: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4&submenu=51>>. Acesso em: 20 de julho de 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 1328: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____.**NBR 5736: Cimento. Cimento Portland Pozolânico**; 1991.
- _____.**NBR 5738:Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos**. Rio de Janeiro: ABNT 2008.

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

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT 2009.

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

_____. **NBR 8522 – Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação.** Rio de Janeiro. 2003. 9 p.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 10.004: resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, p.71, 2004.

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

_____. **NBR NM 45:2006 Agregados. Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT 2006.

_____. **NBR NM 52:2009 Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT 2009.

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

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

BATEZINE, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2013.133p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

BHUTTA M.A.R. TSURUTA K., MIRZA J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**. Composites: v. 31, p. 67-73, 2012.

BHUTTA M.A.R., HASANAH N., FARHAYU N., HUSSIN M.W., TAH. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**. Composites: v 47, p. 1243-1248, 2013.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, n.º 147, Part 3, Seção 1, 2010.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p.95-96.

CAMPOS, M. A. **Estudo do reaproveitamento de isoladores elétricos de porcelana como agregados em argamassas e concretos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 155p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2009.

COSTA, J. S. da; MARTINS, C. A.; BALDO, J. B. Reciclagem de louça sanitária no desenvolvimento de concreto não estrutural. **Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**,46., 2004, Florianópolis. Florianópolis: IBRACON, 2004.

CORREIA, J., BRITO, J., PERREIRA, A. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. **Materials and Structures**. Composites: v.39, p.169-177, 2006.

CHINELATTO, A. L.; SOUZA, D. P. F. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte I – Revisão da literatura. **Cerâmica**. Composites. v. 50, p. 62 – 68, 2004.

CROUCH, L. K., SPARKMAN, A., DUNN, TIM R., HEWITT, R., MITTLESTEADT, W., BYARD, B., PITT, J. Estimating pervious PCC pavement design inputs with compressive strength and effective void content. In: **Concrete technology forum, proceedings, national ready mixed concrete association**. Maryland: Silver Spring; 2006. 15p.

DEO O.; NEITHALATH N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**. Composites: v. 25, p. 4181-4189, 2011.

DELATTE, N. Structural Design of Pervious Concrete Pavement. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM, 2007.

FERREIRA, M. G.; SÁ, H. D.; GUARIZZO, V. T.; RIBEIRO, B. G.; ZANIN, C. I. C. B. Utilização da sucata de isoladores cerâmicos para preenchimento de gabiões. **Gestão em Foco**, União das Instituições de Serviços, Ensino e Pesquisa dos Estados de Minas Gerais e São Paulo, 2010.

GOMES, L.B.; BRANDALISE, R.N.; BERGMANN, C.P. Processo de fragmentação de resíduos cerâmicos vitrificados (RCV) visando sua incorporação em concreto refratário sílico-aluminoso. **Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, 56., 2012, Curitiba, 2012.

GOMES, L.B. **Viabilidade da Incorporação de Resíduos Vitrificados de Isoladores Elétricos Cerâmicos no Processo de Obtenção de Revestimentos Refratários Produzidos a Partir de Concreto Sílico-Aluminoso**. 2012. 206f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

GÜNEYISI, E., GESÖGLU, M., ÖZTURAN, T., Properties of rubberized concrete containing sílica fume. **Cement and Concrete Research**. Composites. v.34, p.1-9, 2004.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled highstrength concrete. **Cement and Concrete Research**. Composites. v. 34, p.109–117, 2004.

HÖLTZ, F.C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. Porto Alegre: Programa de Pós - Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.117p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, UFRGS, 2011.

HUANG B, WU H, SHU X, BURDETTE EG. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**. Composites: 2010, v. 24, p. 818–23, 2010

HUFFMAN, D. Understanding pervious concrete. **The Concrete Specifier**, Composites: p. 42 – 49, 2005.

INSTITUDO BRASILEIRO DO CONCRETO. ISAIA.G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 1, 1ª ed., São Paulo, 931 pg, IBRACON, 2011.

JALALI, Said. TORGAL, Fernando Pacheco. **Tendências na Sustentabilidade de Unidades para Alvenaria**. IN:Teoria e Prática na Engenharia Civil. Rio Grande: Editora Dunas, p.19-28, 2010.

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

LINTZ, R. C. C.; et al. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adições de isoladores elétricos de porcelana em substituição ao agregado graúdo. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 34, 2008, Santiago. **Anais**. Santiago: ASAE, 2008.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Editora: LTC -Livros Técnicos e Científicos. 2ª. Ed. Rio de Janeiro, v. 21, p. 456, 1994.

MARTÍNEZ, C.; COTES, T.; CORPAS, F. A. Recovering wastes from the paper industry: Development of ceramic materials. **Processing Technology, Composites**. v. 103, p. 117-124, 2012.

MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement & Concrete Composites. Composites**. v. 34, p. 48 – 54 , 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO; P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2000

MELLO, D., PEZZINI, S., AMICO, S. The effect of post consumer PET particles on the performance of flexible polyurethane foams. **Polymer Testing**. Composites: v.28. p.702-708, 2009.

MONTES, F e HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. Environmental Engineering Science. **University of South Carolina, Columbia**. Composites: v. 23, p. 960 – 969, 2006.

MULLIGAN, A. N. Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems. **University Orlando**, Florida. 145p, 2005.

NAGA, S.M.; EL-MAGHRABY, A. Industrial wastes as raw materials for tile making. **Key Engineering Materials**. Composites. v. 206, p.1787–1790, 2002.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010. Pervious Concrete. Disponível em: <<<http://www.perviouspaviment.org>>>. Acesso em novembro 2013.

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

NEITHALATH N, WEISS J, OLEK J. Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete**. Composites: v.36 p. 2074–85, 2006.

NEITHALATH N.; SUMANASOORIYA M.S.; DEO O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, Composites: v 61, p. 802-813,2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Editora Pini Ltda. 2ª Ed. São Paulo. 1997.

NGUYEN D.H., BOUTOUIL M., SEBAIBI N., LELEYTER L., BARAUD F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. **Construction and Building Materials**, Composites: v. 49, p. 151 – 160, 2013.

PAIXÃO, A.C., CAETANO, A. F., COLIANTEA, R. G. J., LUIZ CARLOS PINTO DA SILVA FILHO. P. C. L., BERGMANN. P. C. Estudo da Viabilidade de Utilização de Resíduos Cerâmicos para Confecção de Argamassas. **Cerâmica Industrial**. v.16, p.33,2011.

PERVIOUS CONCRETE PAVIMENT. Disponível em: <<http://www.perviouspaviment.org>>. Acesso em novembro 2013.

PERVIOUS CONCRETE. Disponível em: <<http://www.perviousconcrete.com>>. Acesso em outubro 2013.

POLASTRE, B. e SANTOS, L. D 2006. **Concreto Permeável**. Disponível em: <http://www.usp.br>, acesso em Janeiro de 2013.

PORTELLA, K. F., A. JOUKOSKI, R. FRANCK, R. DERKSEN. Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado. **Cerâmica**, 52, p. 155 – 167, 2006.

RIBEIRO, R.A.C. V.A. MYMRIN, V.M.T.JUNIOR, H. DE A. PONTE Utilização de pó de exaustão e areia de fundição no desenvolvimento de cerâmica vermelha In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17º CBECIMat, **Anais**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

SÁNCHEZ-MUÑOZ, L.; CARDA, J.B. Materiales residuales, Materias primas y aditivos cerámicos, **Faenza Editrice Iberica, S.L., Castellón**, Composites: p. 159–160, 2002.

SATA V., WONGSA A., CHINDAPRASIRT P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v.42 p. 33-39, 2013.

SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**. v.27, p. 910 – 913, 2005.

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. Properties of concrete containing scrap-tyre rubber – and overview. **Waste Management**, Composites: v.24, p. 563-569, 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – **SNIC**. Disponível: <<http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf>. > Acesso em: 20 de janeiro de 2012.

SUMANASOORIYA MS, NEITHALATH N. Stereology and morphology based pore structure descriptors of enhanced porosity (pervious) concretes, **ACI. Mat J. Composites.**: v.38 p.106:429 2009

SCHAEFER, V.R., WANG, K., SULEIMAN, M.T., AND KEVERN, J.T. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Final Report, Report 2006-1, **National Concrete Pavement Technology Center**, 2006.

TENNIS, P.D., LEMING, M.L., and AKERS, D.J. (2004). **Pervious Concrete Pavements**. Skokie, IL: Portland Concrete Association and Silver Spring, MD: National Ready Mixed Concrete Association, p. 32, 2004.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Reusing ceramic waste in concrete. **Construction and Building Materials**. Composites. v 24, p. 832 – 838, 2010.

VANCURA M., MACDONALD K., KHAZANOVICH L. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate. **Cement and Concrete**. Composites, v. 33, p. 1080-1085,2011.

VIEIRA R.K., SOARES R.C., PINHEIRO S.C., PAIVA O.A., ELEUTÉRIO J.O., VASCONCELOS R.P. Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, Composites, v. 24, p. 1754-1760, 2010.

ZAETANG Y., WONGSA A., SATA V., CHINDAPRASIRT P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Composites, V. 48, P. 585-591, 2013.

ZIMMERMANN, M.V.G.; ZATTERA, A. J. Recycling and reuse of waste from electricity distribution networks as reinforcement agents in polymeric composites. **Waste Management**, Composites, v. 33, p. 1667–1674, 2013.

ANEXOS

ANEXO 1. Laudo Técnico Fornecido pelo Fabricante Votorantim Cimentos –
Cimento CP IV – 32 da marca Votoran

Atualizado em:		Boletim de Qualidade do Produto Expedido													
4/07/12-48		Produtor: CPV-32							NBR 5736						
		Marca: Votoran							Pinheiro Machado						
		ENSAIOS QUÍMICOS							ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS						
		TEORES (%)				Fibras(%)		Baixa	Água de consist.	Tempo Pega		Exp. Claste	Resist. à Compressão(MPa)		
Data de Produção		PI	MgO	SO3	RI	#200	#325	cm2/g	(%)	Início de Pega (min)	Fim (min)	(min)	Resistência 3 Dias	Resistência 7 Dias	Resistência 28 Dias
Data		< 4,5	< 4,5	< 4,0	0	< 0,6	N/A	N/A	N/A	< 10	< 60	< 5,0	< 10,0	< 20,0	< 30,0
01/03/2013		2,2	4,7	1,2	32,19	0,3	2	4370	33,2	405	500	0	16,4	20,9	36,1
02/03/2013															
03/03/2013															
04/03/2013		2,4	4,4	1,6	37,29	0,3	2,8	4380	31,6	335	425	0,0	16,5	22,9	35,2
05/03/2013		3,0	4,5	1,5	35,82	0,3	2,8	4560	32,0	380	470	0,0	16,7	21,2	
06/03/2013		1,2	4,4	1,5	34,80	0,3	2,8	4080	32,0	340	430	0,0	17,5	22,4	
07/03/2013		2,3	4,6	1,7	29,37	0,2	2,3	4380	31,4	330	430	0,0	17,9	23,7	
08/03/2013		2,3	4,2	1,7	35,95	0,1	2,0	4540	32,4	340	420	0,0	17,1	22,3	
09/03/2013															
10/03/2013															
11/03/2013		3,6	4,6	1,7	30,72	0,2	2,4	4520	31,8	370	460	0,0	17,6	21,6	
12/03/2013		2,6	4,6	1,4	31,46	0,3	2,3	4390	31,8	310	400	0,0	16,3	20,5	
13/03/2013		3,2	4,7	1,6	29,80	0,3	2,6	4350	31,8	360	440	0,0	18,1	22,6	
14/03/2013		2,5	4,7	1,6	30,00	0,7	4,9	4640	31,6	255	330	0,0	17,4	22,9	
15/03/2013		2,8	4,6	2,0	28,63	0,3	2,6	4500	31,8	360	495	0,0	19,3	24,8	
16/03/2013															
17/03/2013															
18/03/2013		2,9	4,6	1,9	29,15	0,4	3,5	4760	31,4	345	430	0,0	19,5	25,4	
19/03/2013		2,7	4,5	1,8	29,93	0,3	2,7	4620	31,0	310	400	0,0	19,1	24,1	
20/03/2013		2,9	4,5	1,7	28,44	0,3	2,5	4460	31,0	300	410	0,0	19,3	23,8	
21/03/2013		3,3	5,0	1,7	28,08	0,6	3,8	4630	31,0	315	400	0,0	19,4	23,3	
22/03/2013		2,5	4,9	1,5	30,84	0,3	2,4	4780	31,2	310	390	0,0	18,2	22,8	
23/03/2013															
24/03/2013															
25/03/2013		2,7	4,8	1,8	30,92	0,2	2,3	4870	31,6	370	460	0,0	17,8	23,2	
26/03/2013		2,5	4,7	2,1	30,95	0,3	2,8	4840	31,4	355	440	0,0	18,2	23,6	
27/03/2013		2,5	4,9	2,4	27,66	0,3	3,0	4730	31,4	360	440	0,0	18,3		
28/03/2013		2,5	4,8	2,0	28,89	0,2	2,1	4910	31,4	320	390	0,0			
29/03/2013															
30/03/2013															
31/03/2013															
Média		2,6	4,6	1,7	31,04	0,3	2,7	4566	31,6	339	428	0,0	17,9	22,9	35,6
Desvio Padrão		0,5	0,2	0,3	2,80	0,1	0,7	211	0,5	34	39	0,0	1,1	1,3	0,6
Mínimo		1,2	4,2	1,2	27,66	0,1	2,0	4080	31,0	255	330	0,0	16,3	20,5	35,2
Máximo		3,6	5,0	2,4	37,29	0,7	4,9	4910	33,2	405	500	0,0	19,5	25,4	36,1

Idade (Dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
R1	0	0
R3	17,5	0
R7	22,9	0
R28	35,6	0

Observações: * Massa Específica deste cimento: 1,71 g/cm³

Oscar Alfredo Klein Neto
Responsável Controle de Qualidade
Votorantim Cimentos S/A

Nome
Responsável Comandist
Votorantim Cimentos S/A

ANEXO 2. Distribuição Granulométrica Diferencial (DGD) dos Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana (GOMES, 2012).

