



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**DESEMPENHO DO CONCRETO POROSO COM
AGREGADOS SUSTENTÁVEIS**

Londrina
2014

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**DESEMPENHO DO CONCRETO POROSO COM
AGREGADOS SUSTENTÁVEIS**

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

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

Londrina
2014

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

Sandoval, Gersson Fernando Barreto.

Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis / Gersson Fernando Barreto Sandoval. - Londrina, 2014.
108 f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Concreto - Permeabilidade - Tese. 2. Construção - Concretos porosos - Tese. 3. Agregados (Materiais de construção) - Tese. 4. Concreto compactado a rolo - Tese. I. Toralles, Berenice Martins . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**DESEMPENHO DO CONCRETO POROSO COM AGREGADOS
SUSTETÁVEIS**

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

BANCA EXAMINADORA

Profª Drª Berenice Martins Toralles
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profª Drª Raquel Souza Teixeira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profª Drª Nayara Soares Klein
Universidade Federal de Paraná - UFPR

Dr. Isaac Galobardes Reyes
Universitat Politècnica de Catalunya - UPC

Londrina, 21 de novembro de 2014.

Aos meus pais **Jose Hildebrando Barreto Riaño** e **Rosalba Sandoval Blanco**
Por ensinar-me o amor ao trabalho e que investir em conhecimento traz sempre os
melhores resultados

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me mostrar o caminho a seguir, por me dar força nos meus momentos de fraqueza e trazer alegria nos momentos de tristeza.

A CAPES pela bolsa recebida durante o desenvolvimento do mestrado.

A Prof.^a Dr.^a Berenice Martins Toralles quem mais que minha orientadora foi minha guia pelos sendeiros do conhecimento, pela sua paciência, sua compreensão e sua inteira colaboração em todo momento.

Ao Prof.^a Dr.^a Raquel de Souza Teixeira, pelo auxílio e presteza, e o conhecimento transmitido sobre o assunto abordado.

Aos meus avós que tristemente partiram deste mundo este ano, deixando muitas saudades no meu coração, vocês sempre foram meu exemplo de vida e de superação.

Aos meus pais Jose Barreto e Rosalba Sandoval pelo carinho, apoio e compreensão, embora eles não tenham estado juntos sempre estiveram na minha mente e no meu coração nesta longa caminhada durante todo o tempo, sem vocês eu não seria nada.

A minha irmã Gina, meu sobrinho Santiago e minha tia Nubia porque sempre foram a minha fonte de inspiração, obrigado por dar alegria na minha vida.

Ao meu grande amigo Jose Carlos Gasparine sua querida esposa Isabel e suas filhas Vitória e Carolina por me receber em sua casa, como se fosse um filho mais, pela confiança e o apoio no momentos difíceis.

A minha amiga Livia, por ter me ajudado sempre e me dar dicas para melhorar o meu trabalho.

Aos meus amigos e colegas Marcos, Jesus e Isis por ter compartilhados estes dois anos comigo.

Aos Srs. André e Anderson, do Laboratório de Materiais de Construção do CTU/UEL, pela força e todo o apoio no desenvolvimento das atividades experimentais.

Ao aluno do curso de graduação em Engenharia Civil da UEL, Edgor Diego que foi de muita ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do programa de pós- Graduação em engenharia de edificações e saneamento, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência.

Ao meu grande amigo Ricardo Piellarisi pelas dicas e pela ajuda nos ensaios durante meu estagio em Barcelona.

Finalmente a todas as pessoas que de uma ou outra forma sempre estiveram ai para me dar uma mão e ajudar a seguir em frente.

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

RESUMO

A impermeabilização dos solos devido a urbanização vem sendo um dos grandes problemas da atualidade já que leva a uma mudança radical do ciclo hidrológico. Além disso, contribui para as enchentes, hidroplanagem e proliferação de doenças. Dessa forma o estudo de novos materiais é muito importante na tentativa de dar resposta a este tipo de problema. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho mecânico e hidráulico do concreto poroso com agregados sustentáveis. Os agregados escolhidos como referência nesta pesquisa foram agregados de basalto. Os agregados sustentáveis escolhidos foram: agregados graúdos de escória siderúrgica, resíduo de construção civil (RCC) cerâmico e, finalmente, resíduo de construção civil (RCC) de bloco de concreto de alvenaria estrutural. O traço, em massa, utilizado nas misturas de concreto poroso foi 1:3,26, com um consumo de cimento aproximado de 420 kg/m^3 , relação a/c igual a 0,34, sem uso de aditivos químicos ou adições minerais. Foram avaliadas resistência à compressão, à flexo-tração, vazios, permeabilidade e desgaste. No caso da permeabilidade foram utilizados dois tipos de ensaios: de carga constante e de carga variável. Os resultados obtidos mostram que os agregados siderúrgicos apresentam o melhor comportamento mecânico, com valores de resistência à compressão e flexo-tração na ordem de 10,0 e 2,9 MPa, respectivamente. Verificou-se que para a resistência à compressão o parâmetro mais relevante foi a natureza do agregado e não a granulometria. Já na flexo-tração o parâmetro que mais impactou no desempenho foi a porcentagem de finos. Para o desempenho hidráulico o parâmetro preponderante foi a porcentagem de vazios, que neste trabalho ocorreu com RCC cerâmico apresentando 27% de vazios, e permeabilidade de 15,2 mm/s. Desta forma, verificou-se que a utilização de agregados sustentáveis é uma alternativa viável na produção de concreto poroso.

Palavras-chave: Concreto poroso. Agregados siderúrgicos. RCC Comportamento mecânico. Vazios. Permeabilidade.

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

ABSTRACT

Nowadays, one of the major problems related to urbanization process is soil sealing, it leads to a radical change on the hydraulic cycle. It also contributes to floods, aquaplaning and outbreaks of diseases. In this sense, study of new materials became important in the attempt to solve these issues. The objective of the present work is to evaluate the mechanical and hydraulic performance of pervious concrete with sustainable aggregates. Basaltic aggregates were chosen as reference in this research. Slag aggregates, recycled ceramic and construction blocks waste aggregates were chosen as sustainable aggregates. Mixture design, in mass, of pervious concrete used was 1:3.26 with an approximate consumption of 420 kg/m³, water cement ratio of 0.34, without any additives or admixtures. Compressive and flexural strengths, voids (%), water permeability and abrasion were analyzed. In the case of permeability, two methods were used: falling and constant head permeameter. The results showed the slag aggregates with the best mechanical behavior, presenting compressive and flexo-traction strength in the order of 10.10 and 2.92 MPa, respectively. It was observed that for compressive strength the most important parameter is the nature of the aggregate and not granulometry. However, the percentage of fines had a great influence on the flexural strength. Regarding permeability, the predominant parameter was the percentage of voids, and recycle ceramic waste aggregates, with around 27 % of voids, presented the best results in the order of 15.2mm/s. In this sense, the usage of sustainable aggregates is a viable alternative in the production of pervious concrete.

Keywords: Pervious concrete. Slag aggregates. Recycle ceramic waste aggregates. Mechanical behavior. Voids. Permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de vazios no concreto poroso.....	15
Figura 2.2 – Máquina Corelok para medição de vazios em estado endurecido	17
Figura 2.3 – Procedimento de instalação de amostras na máquina CoreLok	17
Figura 2.4 – Variação da porosidade com a profundidade.....	20
Figura 2.5 – Relação dos vazios com a massa específica do material	21
Figura 2.6 – Variação da resistência a compressão com o aumento da massa unitária	22
Figura 2.7 – Relação da resistência à compressão e o coeficiente de uniformidade Cu.....	23
Figura 2.8 – Correlação da resistência à compressão e os vazios no concreto poroso	24
Figura 2.9 - Correlação entre resistência a compressão e os vazios no concreto poroso	25
Figura 2.10 – Relação da resistência à compressão e a resistência à flexo-tração ..	27
Figura 2.11 – Relação da resistência à compressão com o consumo de cimento e a relação a/c.....	27
Figura 2.12 – Relação da resistência à flexo-tração com as diferentes fibras	28
Figura 2.13 – Relação entre a permeabilidade e o coeficiente de uniformidade CU.	29
Figura 2.14 – Permeômetro NCAT.....	31
Figura 2.15 – Método ASTM C1701 para medição de permeabilidade em campo ...	31
Figura 2.16 – Comparação da perda de massa (%) em função do uso de látex e adição de fibra.....	33
Figura 2.17 – Comparação do desgaste em função da adição de fibra e o uso de polímero	34
Figura 2.18 – Aplicações do concreto poroso	35
Figura 2.19 - Processo de produção do aço no Brasil.....	38
Figura 2.20 – Coprodutos gerados na produção de aço e sua aplicabilidade no Brasil	38
Figura 2.21 – Impactos produzidos pela má disposição dos resíduos de construção civil	41
Figura 2.22 – Materiais constituintes dos resíduos de construção civil (RCC)	42
Figura 3.1 – Curvas granulométricas B0, B1 e 50/50.....	45
Figura 3.2 Processo de produção do concreto.....	47
Figura 3.3 – Tempos de mistura a) 3 min b) 5 min c) 7 min	48
Figura 3.4 – Procedimento de adensamento dos corpos de prova de 100 mm por 200 mm	49
Figura 3.5 – Estudo do procedimento de compactação	50
Figura 3.6 – Placas de concreto: a) B0; b) B1; c) 50/50.....	50
Figura 3.7 – Corpos de Prova ensaio de permeabilidade a) B0 b) B1 c) 50/50.....	51
Figura 3.8 – Adaptação ensaio de permeabilidade para solos finos NBR 14545.....	52
Figura 3.9 – Montagem do ensaio de permeabilidade	53

Figura 3.10 – Curvas granulométricas Basalto, Escória, RCC cerâmico e RCC Concreto.....	55
Figura 3.11 – Ensaio de massa específica.....	59
Figura 3.12 – Montagem ensaio de medição dos vazios	60
Figura 3.13 – Ensaio de permeabilidade de carga constante	61
Figura 3.14 – Montagem ensaio de permeabilidade de carga constante	62
Figura 3.15 – Ensaio de desgaste (Cantabro).....	63
Figura 4.1 – Evolução da resistência à compressão	67
Figura 4.2 – Comparação da resistência à flexo-tração	68
Figura 4.3 – Comparação coeficientes de permeabilidade k.....	70
Figura 4.4 – Acabamento Placas Primeira Campanha Experimental.....	71
Figura 4.5 – Ensaio de consistência segunda campanha experimental a) Basalto b) Escória C) RCC Cerâmico d) RCC Concreto	72
Figura 4.6 – Variação da massa unitária dependendo o tipo de agregado	73
Figura 4.7 – Vazios internos das misturas trabalhadas: a) Basalto b) Escória c) RCC Cerâmico d) RCC Concreto.....	74
Figura 4.8 – Evolução da resistência à compressão	76
Figura 4.9 – Comparação da resistência à flexo-tração segundo o tipo de agregado	78
Figura 4.10 – Comparação dos vazios (%) segundo o tipo de agregado.....	79
Figura 4.11 - Comparação entre os coeficientes de permeabilidade para carga variável.....	81
Figura 4.12 – Comparação coeficiente de permeabilidade k para carga constante ..	82
Figura 4.13 – Corpos de prova do ensaio de desgaste.....	83
Figura 4.14 – Resistência ao Desgaste.....	83
Figura 4.15 – Comparação das resistências médias a compressão	85
Figura 4.16 – Comparação das resistências médias à flexo-tração	87
Figura 4.17 – Comparação das porcentagens de vazios médias.....	88
Figura 4.18 – Análise estatístico da permeabilidade k para carga variável.....	90
Figura 4.19 – Análise estatístico permeabilidade k para carga constante.....	91
Figura 4.20 – Correlação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios	92
Figura 4.21 - Correlação entre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade para carga constante	93
Figura 4.22 – Correlação entre a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade para carga constante	94
Figura 4.23 – Relação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios (%).....	96
Figura 4.24 – Relação da resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade k	97
Figura 4.25 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade k e a porosidade (%) .	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Dosagens de concreto poroso definidas em pesquisas no mundo.....	10
Quadro 2.2 - Massa específica no estado fresco do concreto poroso.....	14
Quadro 2.3 - Porcentagem de vazios (%) nas pesquisas estudadas	19
Quadro 2.4 - Valores da resistência à compressão nas diferentes pesquisas do mundo	25
Quadro 2.5 - – Valores do coeficiente de permeabilidade k nas diferentes pesquisas no mundo	30
Quadro 2.6 - – Pesquisas feitas no mundo nos diferentes usos do RCC.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química das escórias siderúrgica	39
Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados graúdos da primeira campanha	45
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo	46
Tabela 3.3 – Consumo de materiais por m ³ da primeira campanha experimental	47
Tabela 3.4 – Planejamento experimental	52
Tabela 3.5 – Resultados ensaios de caracterização dos agregados graúdos.....	55
Tabela 3.6 – Análise granulométrica dos agregados graúdos sustentáveis.....	56
Tabela 3.7 – Consumo de materiais por m ³ de concreto.....	57
Tabela 3.8 – Planejamento experimental segunda campanha.....	58
Tabela 3.9 – Resumo Campanhas experimentais.....	64
Tabela 4.1 – Porcentagens de material para cada uma das granulometrias	66
Tabela 4.2 – Resistência à compressão primeira campanha experimental	66
Tabela 4.3 – Resistência à flexo-tração da primeira campanha experimental	68
Tabela 4.4 – Porcentagem de Vazios (%) primeira campanha experimental.....	69
Tabela 4.5 – Coeficiente de permeabilidade k das misturas de concreto poroso	70
Tabela 4.6 - Resumo Primeira Campanha Experimental	71
Tabela 4.7 - Porcentagens de material para cada um dos materiais	74
Tabela 4.8 – Resistência à compressão segunda campanha experimental.....	76
Tabela 4.9 – Resistência à flexo-tração das misturas de concreto poroso	77
Tabela 4.10 – Vazios (%) nas misturas de concreto poroso	79
Tabela 4.11 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade k para carga variável	80
Tabela 4.12 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade para carga constante	81
Tabela 4.13 – Análise de variâncias da resistência à compressão	85
Tabela 4.14 – Análise de variâncias resistência à flexo-tração	86
Tabela 4.15 – Análise de variâncias dos vazios (%)	88
Tabela 4.16 – Comparação dos parâmetros estatísticos para os dois tipos de ensaios.....	89

Tabela 4.17 – Equações de correlação entre as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto poroso.....	95
--	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Medição dos vazios em estado endurecido	15
Equação 2.2 – Medição teórica dos vazios	16
Equação 2.3 – Cálculo dos vazios usando a máquina CoreLok.....	18
Equação 2.4 – Coeficiente de uniformidade.....	22
Equação 2.5 – Cálculo da permeabilidade utilizando o método ASTM C1701	32
Equação 3.1 – Cálculo do coeficiente de permeabilidade k a carga variável	53
Equação 3.2 – Cálculo da porcentagem de vazios em estado endurecido	60
Equação 3.3 – Cálculo da permeabilidade k a carga constante.....	62
Equação 3.4 – Cálculo da perda por desgaste do material.....	64
Equação 4.1 – Cálculo teórico da porcentagem de vazios.....	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivo geral	4
1.2.1 Objetivos específicos	4
1.3 Questão de pesquisa	5
1.4 Hipótese	5
1.5 Estrutura do trabalho	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Introdução	7
2.2 Concreto poroso	7
2.2.1 História	7
2.2.2 Materiais constituintes	8
2.2.3 Dosagem	9
2.2.4 Propriedades do concreto poroso	13
2.2.5 Porosidade	14
2.2.6 Resistência à compressão	22
2.2.7 Resistência à flexo-tração	26
2.2.8 Permeabilidade	28
2.2.9 Desgaste	32
2.2.10 Aplicações	34
2.3 Materiais sustentáveis	37
2.3.1 Escória siderúrgica	37
2.3.2 Resíduos de construção civil (RCC)	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Primeira Campanha experimental	44
3.1.1 Caracterização dos agregados graúdos	44
3.1.2 Métodos	46
3.2 Segunda campanha experimental	54
3.2.1 Caracterização dos agregados graúdos sustentáveis	54
3.2.2 Métodos	57
3.2.3 Ensaio em estado fresco	58
3.2.4 Medição dos vazios (%)	59

3.2.4 Ensaio de permeabilidade.....	61
3.2.5 Desgaste (%)	63
3.3 Resumo das campanhas experimentais	64
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	65
4.1 Primeira campanha experimental.....	65
4.1.1 Influência dos finos no desempenho do concreto poroso	65
4.1.2 Resistência à compressão	66
4.1.3 Resistência à flexo-tração.....	68
4.1.4 Porcentagem de Vazios (%)	69
4.1.5 Permeabilidade	70
4.1.6 Resumo Primeira Campanha Experimental.....	71
4.2 Segunda campanha experimental.....	72
4.2.1 Propriedades em estado Fresco	72
4.2.2 Influência dos finos no desempenho do concreto poroso	73
4.2.2 Resistência à compressão	75
4.2.3 Resistência à flexo-tração.....	77
4.2.4 Porcentagem de Vazios (%)	79
4.2.5 Permeabilidade	80
4.2.6 Desgaste.....	82
4.3 Análise estatística dos resultados	84
4.3.1 Resistência à compressão	84
4.3.2 Resistência à flexo-tração.....	86
4.3.3 Porcentagem de Vazios (%)	87
4.3.4 Permeabilidade	89
4.4 Correlações.....	91
4.5 Comparação dos resultados com outras pesquisas.....	95
4.5.1 Resistência à compressão (MPa) e a porcentagem de vazios (%).....	95
4.5.3 Resistência à compressão vs permeabilidade k	96
4.5.1 Permeabilidade k vs porcentagem de vazios (%)	97
5. CONCLUSÕES	99
5.1 Recomendações para pesquisas futuras	100
6. BIBLIOGRAFIA	102

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades vem aumentando de uma maneira rápida e desordenada nos últimos 20 anos. Tal crescimento somado à falta de planejamento traz consigo: a poluição do ar, a geração de resíduos sólidos, a perda da biodiversidade e a impermeabilização do solo. Esta última relacionada à pavimentação de ruas e à indústria da construção civil.

Das áreas impermeabilizadas se derivam problemas como as enchentes e o escoamento ineficiente das águas pluviais, as quais muitas vezes não têm para onde ir permanecendo, sobre a superfície das vias. Isso impede o fluxo normal destas águas, sendo um risco iminente para a população civil. Em resposta a este tipo de problema pesquisas vem sendo realizadas na busca de materiais que permitam a passagem da água pela sua estrutura sem alterar as propriedades mecânicas (POTOCNIK, 2012).

Em sua grande maioria os materiais utilizados na construção civil são materiais com baixa permeabilidade. Desta forma a água não consegue ter um fluxo livre, ficando na superfície. Um destes materiais é o concreto, que depois do aço, é o segundo material mais usado no mundo, o qual tem um coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-8} m/s, consequência de uma porcentagem de vazios muito baixa. Estes vazios estão isolados e vão garantir que a água não consiga passar tão facilmente pelo material (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O uso de materiais permeáveis ajudaria a diminuir os impactos ocasionados pela impermeabilização. Isto daria equilíbrio no ciclo hidrológico que é alterado de maneira radical com os recobrimentos impermeáveis das grandes cidades, minimizando o risco de acidentes pelo fenômeno da hidroplanagem, das doenças que se derivam das enchentes, garantindo a segurança do meio.

Frente ao problema levantado pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre materiais permeáveis, destacando-se as publicadas por Acioli (2005), Agar

Ozbek *et al.*, (2013), Agrela *et al.*, (2012), Aoki (2009), Azzout (1994), Castro *et al.*, (2009), Shu *et al.*, (2011), Tennis *et al.*, (2004). Estes trabalhos mostram que é viável a utilização de materiais permeáveis para diminuir os efeitos da impermeabilização sem perder a funcionalidade estrutural própria deste tipo de material.

Entre estes materiais está o concreto poroso que, por sua composição e como o próprio nome já diz, tem uma elevada porosidade. Este concreto tem uma capacidade de drenagem maior que o convencional, o que reduz a vazão das águas pluviais presente nas vias (ACIOLI, 2005).

Este tipo de concreto é uma resposta à problemática ambiental causada pelas inundações nas cidades, mas ainda carece de um estudo mais profundo. O concreto poroso tem aplicação em pavimentação de estradas de baixo trânsito, ciclovias, estacionamentos e zonas de espaço público (calçadas) onde, na maioria das vezes, o escoamento da água é um grave problema. Os materiais convencionais na fabricação do concreto poroso aumentam a exploração de recursos incrementando as problemáticas ambientais existentes e fazem com que o material perca o seu grande ganho ambiental.

Portanto o uso de materiais sustentáveis derivados do reaproveitamento de resíduos de construção civil e da indústria do aço torna-se uma solução à problemática ambiental de exploração de recursos, quando conhecido o seu verdadeiro desempenho como agregado na produção de concreto.

Diante do exposto, se verifica a necessidade de desenvolver uma pesquisa que confirme a viabilidade de usar materiais permeáveis para resolver os problemas relacionados ao escoamento superficial das águas. Neste sentido, o uso de materiais sustentáveis é uma alternativa viável, desde que os mesmos atendam os desempenhos mecânicos e hidráulicos para este tipo de concreto.

1.1 Justificativa

As constantes inundações nas diferentes partes do planeta vêm desencadeando uma série de problemas ambientais. Este fato pôde ser constatado na República Dominicana, em junho de 2004, onde chuvas intensas deixaram 414 vítimas mortais e problemas com o abastecimento de água potável. Neste ano, no Haiti, em consequência das enchentes, mais de 1600 pessoas desapareceram e 900 morreram. Já na América do Sul, um exemplo foi no Rio de Janeiro, onde em janeiro de 2011 choveu 95 % do esperado para aquele mês, colapsando totalmente o tráfego da cidade por causa da ineficiência do sistema de drenagem frente a eventos de precipitação desta natureza. Países como Colômbia têm investido mais de U\$ 8 bilhões em obras para mitigar as catástrofes causadas pelas mudanças climáticas (CRUZ ROJA ESPAÑOLA, 2004; GREENPEACE ASSOCIAÇÃO CIVIL, 2011; COLÔMBIA HUMANITARIA, 2011).

As inundações são consequência de fatores ambientais causadas pelas mudanças climáticas, pelas deficiências hidráulicas e baixa manutenção dos sistemas de drenagem de água pluviais, que não têm capacidade de suportar eventos de precipitação acima da média. Sendo assim, a impermeabilização do solo gerada pelo processo acelerado de urbanização (construção de edifícios, pavimentação de ruas etc.) impede o curso normal da água.

Para mitigar os problemas causados pelas inundações nos centros urbanos, países da Europa e os Estados Unidos estão incentivando projetos de pesquisa relacionados ao desenvolvimento de um material, o concreto poroso, capaz de permitir a água pluvial escoar pelo interior de sua estrutura, o que garante uma drenagem adequada durante eventos de precipitação.

Na América do Sul não têm sido desenvolvidas muitas pesquisas que estudem com profundidade este tipo de material, por conseguinte, não há normas específicas para este tipo de concreto, o que dificulta seu desenvolvimento. Portanto, justifica-se que pesquisas nesta área sejam desenvolvidas contribuindo para o estado da arte deste material e, assim, propor aplicações no campo da engenharia (CÔRTEZ, 2009; ACIOLI, 2005).

A realização de uma mistura de concreto poroso não tem restrições na hora da escolha do tipo de cimento nem do tipo de agregado graúdo a serem utilizados. Neste sentido, estudos sobre a influência do emprego de agregados sustentáveis no desempenho deste tipo de material são fundamentais (KEVERN *et al.*, 2009; CHOPRA *et al.*, 2007; TENNIS *et al.*, 2004).

Atualmente, o reuso de materiais é imprescindível para manter a sustentabilidade ambiental. Estudos de novas tecnologias têm papel fundamental no desenvolvimento e na aplicação de alternativas no setor da indústria da construção civil. Um exemplo de reuso de material são os agregados siderúrgicos, provenientes da sucata metálica. Estes apresentam características similares às dos agregados graúdos utilizados na produção de concreto. Por outro lado estão também os resíduos de construção civil (RCC) cerâmicos e de concreto que, atualmente, não são tão utilizados nem reaproveitados. Sendo assim, o uso destes tipos de materiais é uma alternativa para minimizar o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil (MEYER, 2001).

Desta forma, é necessário realizar estudos que verifiquem o desempenho mecânico e hidráulico do concreto poroso com agregados sustentáveis em resposta as problemáticas ambientais.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o desempenho mecânico e hidráulico do concreto poroso com agregados sustentáveis, sendo estes agregados oriundos de basalto (referência), de escória siderúrgica e resíduos de construção civil cerâmicos e de concreto.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estabelecer o tempo de mistura para concreto poroso;
- Determinar a influência da granulometria no desempenho do concreto poroso;
- Estudar a influência dos agregados miúdos e finos com as propriedades mecânicas e hidráulicas do material;
- Caracterizar os agregados sustentáveis;
- Estudar a relação paramétrica das propriedades mecânicas e hidráulicas avaliadas;

- Comparar os ensaios de permeabilidade de carga variável e constante e definir qual é o que mais se adequa para este tipo de material.

1.3 Questão de pesquisa

É possível utilizar agregados sustentáveis na produção do concreto poroso mantendo uma resposta mecânica e hidráulica adequada?

1.4 Hipótese

A incorporação de diferentes agregados, neste caso, agregados sustentáveis, na produção do concreto poroso é uma alternativa viável tanto no desempenho mecânico como hidráulico, sem necessidade de incorporar aditivos químicos e adições minerais.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro dedicado a introdução, a justificativa, os objetivos, a questão de pesquisa e a hipótese.

No segundo capítulo se apresenta a revisão bibliográfica, estudando primeiramente a dosagem, as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto poroso. As principais propriedades estudadas são resistência à compressão, flexo-tração, permeabilidade, porcentagem de vazios (%) e desgaste. Finalmente, se fez um levantamento da geração de resíduos siderúrgicos (escória) e da construção civil (RCC) e suas aplicações atuais.

Os materiais empregados e os métodos utilizados no desenvolvimento das campanhas experimentais se encontram no terceiro capítulo. Os métodos adotados na pesquisa estão fundamentados na normatização técnica nacional e internacional. Ressalta-se que os ensaios não normatizados foram adaptados com base na literatura técnica.

Os resultados e análise, tanto no que se refere as características mecânicas quanto as hidráulicas do material, a análise estatística, as correlações e a comparação com outros trabalhos estão apresentadas no quarto capítulo.

Finalmente, o quinto e último capítulo traz as conclusões do trabalho, relacionadas com os objetivos propostos e à confirmação ou não da hipótese, a resposta da questão de pesquisa e por último sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O presente capítulo apresenta a compilação do estado da arte do concreto poroso. Para isso, foram pesquisados alguns aspectos gerais, as dosagens utilizadas, as principais características, propriedades em estado fresco e endurecido, principalmente resistência à compressão, resistência à flexo-tração, porcentagem de vazios, permeabilidade, desgaste e aplicações.

Além disso, foram estudadas as características da escória siderúrgica e dos resíduos de construção civil como agregados graúdos para misturas de concreto. Também foram estudados o processo de produção e seus diferentes usos, bem como a importância de utilizar este tipo de material para manter um equilíbrio com o meio ambiente.

2.2 Concreto poroso

2.2.1 História

A origem do concreto poroso foi na Europa, no século XIX, sendo que as principais aplicações eram na construção de muros divisórios e pavimentação, em virtude do baixo consumo de cimento deste tipo de concreto comparado ao concreto convencional. Também sabe-se que esse material foi utilizado para a construção de casas no Reino Unido e Escócia na Primeira e Segunda Guerra Mundial devido à escassez de produtos cimentícios nas diferentes partes da Europa (CHOPRA *et al.*, 2007).

Foi inicialmente utilizado na França nos anos 1950, onde eram feitas misturas de materiais com elevada porosidade. Porém, a baixa qualidade destes não permitiu um desenvolvimento satisfatório; vinte anos depois voltou-se a pesquisar e trabalhar com esse tipo de mistura nos Estados Unidos, Japão, França e outros países na Europa (AZZOUT, 1994).

Nos anos 1970, nos Estados Unidos, no estado da Flórida, o concreto poroso começou a ser amplamente utilizado em razão dos problemas com o

escoamento superficial das águas pluviais em áreas urbanas. De 1970 até 2004 este concreto foi utilizado de maneira empírica pelo fato de carecer de uma normativa que regulamentasse as dosagens e o seu desempenho mínimo. Em consequência disto, a associação americana de cimento portland (PCA) no ano de 2004 fez o primeiro manual de concreto poroso, aonde se encontram generalidades do material e algumas recomendações sobre dosagem e faixas de valores de desempenho (TENNIS *et al.*, 2004).

Devido ao excelente desempenho apresentado depois do ano 2004, o concreto poroso tornou-se popular e os demais estados dos Estados Unidos passaram a utilizá-lo (CONCRETE PROMOTION GROUP, 2012).

2.2.2 Materiais constituintes

O concreto poroso é constituído basicamente pelos mesmos materiais que o concreto convencional, diferindo no teor de agregado miúdo que é bem baixo, ou geralmente nulo, para facilitar a formação de vazios interconectados na estrutura interna do material (TENNIS *et al.*, 2004).

Os cimentos para a produção de misturas de concreto poroso não apresentam restrição quanto ao tipo (TENNIS *et al.*, 2004).

Na elaboração do concreto poroso pode-se trabalhar com agregados graúdos de granulometria contínua, uniforme ou descontínua, onde a contínua apresenta grãos de diferentes tamanhos, a uniforme praticamente todos os grãos de material tem o mesmo tamanho e a descontínua carece de um tamanho para completar sua curva granulométrica. Portanto, para permitir a máxima drenagem de água recomenda-se a uniforme e para ter um melhor comportamento mecânico a contínua, alguns autores recomendam que o diâmetro máximo nominal seja 10 mm (CASTRO *et al.*, 2009).

Quanto a água, recomenda-se utilizar água potável, a qual não altera as propriedades em estado fresco e endurecido do material (TENNIS *et al.*, 2004).

Podem ser utilizadas fibras de vidro, aço, ou poliméricas no intuito de melhorar propriedades como a flexo-tração e o desgaste.

Finalmente, podem ser utilizados aditivos químicos plastificantes e ou redutores de água de elevada efetividade no intuito de melhorar a plasticidade do material e conseguir obter um maior tempo de trabalho para a mistura.

2.2.3 Dosagem

Pesquisas sobre a dosagem de concreto poroso vem sendo desenvolvidas em diversos países como se pode observar no Quadro 2.1.

Verifica-se pelo Quadro 2.1 que o consumo de cimentos varia de 180-555 kg/m³ e os agregados graúdos de 964-2000 kg/m³; a variação do consumo de cimento depende a aplicação do material. Os consumos elevados de cimento nem sempre são garantia de grandes resistências, já que no caso do concreto poroso a resistência está muito ligada a composição granulométrica dos agregados e ao sistema de compactação.

Como verificado no Quadro 2.1, quando a relação água/cimento (a/c) foi muito baixa (menor do que 0,30) utilizou-se aditivo químico para conferir plasticidade na mistura. As relações a/c variaram entre 0,22 e 0,43 o que leva a conclusão de que é um material muito seco, em vista disso o uso de aditivos químicos foi implementado em muitas das dosagens.

Quanto ao tipo de cimento utilizado, no Quadro 2.1 pode-se analisar que quase 90% das dosagens utilizaram cimento portland tipo 1, por ser o mais comum dos cimentos e por se ter um acesso mais fácil nos diferentes países.

Quanto à relação agregado-cimento pode se verificar que, em proporção, os agregados são de 3 a 4,5 vezes a massa de cimento total na mistura, o que facilita a formação da sua estrutura porosa.

Quadro 2.1 – Dosagens de concreto poroso definidas em pesquisas no mundo

Tipo de Aglomerante	Aglomerante (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (lt/m ³)	a/c	Tipo de Aditivos	Aditivos (kg/m ³)	Referência
CP III 40	220	1174	74	0,34	Superplastificante	3	(MERIGHI <i>et al.</i> , 2007)
Cimento Portland tipo 1	270-415	1190-1480	72,9-141,1	0,27-0,34	-	-	(TENNIS <i>et al.</i> , 2004)
Cimento Portland puzolanico de alta resistência inicial	390	1520	136,5	0,35	Plastificante	1,95	(CASTRO <i>et al.</i> , 2009)
Cimento Portland	420	1288,02	134,3	0,34	-	-	(VÉLEZ, 2010)
Cimento Portland	180-360	1440-1620	48,6-154,8	0,27-0,43	-	-	(NRMCA, 2004)
Cimento Portland tipo 1	352	1554	96	0,27	-	-	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
Cimento Portland tipo 1	315	1620	69,3	0,22	LATEX	31,5	(SCHAEFER <i>et al.</i> , 2006)
Cimento Portland tipo 1 e 2	356	1435	123,8	0,35	Redutor de água e estabilizador de hidratação	-	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
Cimento Portland tipo 1	330,4	1486,9	115,6	0,35	-	-	(HUANG <i>et al.</i> , 2010)
Cimento Portland tipo 1	324,9	1461,9	96,6	0,30	LATEX	32,5	(HUANG <i>et al.</i> , 2010)
Cinzas volantes + hidróxido de sódio + silicato de sódio	320	1768	-	-	-	-	(SATA <i>et al.</i> , 2013)

Tipo de Aglomerante	Aglomerante (kg/m³)	Agregado graúdo (kg/m³)	Água (lt/m³)	a/c	Tipo de Aditivos	Aditivos (kg/m³)	Referência
Cimento Portland tipo 1	314	1568	104	0,33	-	-	(NEITHALATH <i>et al.</i> , 2010)
Cimento Portland tipo 1	355	1513	88,8	0,25	Estabilizador de hidratação	1,4	(MAHBOUB <i>et al.</i> , 2009)
Cimento Portland tipo 1	383	1300	130,22	0,34	-	-	(SONEBI & BASSUONI, 2013)
Cimento Portland tipo 1	415	1400	116	0,28	Superplastificante	1,2	(SONEBI & BASSUONI, 2013)
Cimento Portland tipo 1	440	1450	145,2	0,33	-	-	(CHEN <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	380	1692	114	0,30	Polímero SJ-601	45,6	(CHEN <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	284	1453	85	0,30	-	-	(GAEDICKE <i>et al.</i> , 2014)
Cimento Portland tipo 1	449	964	126	0,28	-	-	(CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> , 2008)
Cimento Portland tipo 1	356	1435	123,8	0,35	-	-	(PUTMAN & NEPTUNE, 2011)
Cimento Portland tipo 1	555	1316	167	0,30	-	-	(DEO & NEITHALATH, 2010)
Cimento Portland tipo 1	554	1263	180	0,32	-	-	(DEO & NEITHALATH, 2011)
Cimento Portland tipo 1	417	1671	136	0,33	Emulsão aquosa de um alquil-trimetoxissilano	9,27	(TITTARELLI <i>et al.</i> , 2013)
Cimento I 52.5 endurecimento rápido	351	2000	105	0,30	Superplastificante	0,97	(AGAR OZBEK <i>et al.</i> , 2013)

Tipo de Aglomerante	Aglomerante (kg/m³)	Agregado graúdo (kg/m³)	Água (lt/m³)	a/c	Tipo de Aditivos	Aditivos (kg/m³)	Referência
Cimento Portland tipo 1	340	1395	93	0,27	-	-	(HESAMI <i>et al.</i> , 2014)
Cimento Portland tipo 1	370	1398	111	0,30	Polímero SP	3,7	(RAFIQUE BHUTTA <i>et al.</i> , 2012)
Cimento Portland tipo 1	200	1600	70	0,35	-	-	(IBRAHIM <i>et al.</i> , 2014)
Cimento I 52.5 endurecimento rápido	298	2000	105	0,35	Superplastificante	1,3	(AGAR-OZBEK <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	311,9	1403,6	109,2	0,35	-	-	(DONG <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	360	1430	130	0,36	-	-	(WU <i>et al.</i> , 2011)
Cimento Portland tipo 2	380	1420	100	0,26	LATEX	38	(SHU <i>et al.</i> , 2011)
Cinzas volantes + hidróxido de sódio + silicato de sódio	297,5	1768	-	-	-	-	(THO-IN <i>et al.</i> , 2012)
Cimento Portland tipo 1	496	1279	163	0,33	-	-	(SUMANASOORIYA & NEITHALATH, 2011)
Cimento Portland tipo 1	283	1620	85	0,30	-	-	(BHUTTA <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	394	1350	137,9	0,35	-	-	(KUO <i>et al.</i> , 2013)
Cimento Portland tipo 1	309	1452,3	92,7	0,30	-	-	(NGUYEN <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: o próprio autor

2.2.4 Propriedades do concreto poroso

As principais propriedades do concreto poroso são avaliadas em estado fresco e em estado endurecido. Dependendo de suas propriedades, o material pode ser utilizado para diferentes aplicações (TENNIS *et al.*, 2004; SCHAEFER *et al.*, 2006).

As propriedades que normalmente avaliadas no estado fresco são:

- Consistência medida pelo abatimento no cone de Abrams (geralmente 0 mm) (TENNIS *et al.*, 2004);
- Massa Específica (kg/m^3).

Já no estado endurecido são avaliadas tanto as propriedades mecânicas quanto as propriedades hidráulicas e de durabilidade.

Propriedades Mecânicas:

- Resistência à compressão (MPa);
- Resistência à flexo-tração (MPa).

Propriedades Hidráulicas:

- Porcentagem de vazios (%)
- Permeabilidade (mm/s)

Durabilidade:

- Desgaste (%)

Nas pesquisas realizadas foram encontrados diferentes resultados de massa específica em estado fresco, como mostra o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Massa específica no estado fresco do concreto poroso

Massa Específica (kg/m ³)	Tipo de agregado	Referência
1420-1840	RCC cerâmico e Concreto	(SATA <i>et al.</i> , 2013)
2002	Granito	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
1839-1947	Basalto + Areia	(YANG & JIANG, 2003)
1926-2248	Basalto + Areia	(SONEBI & BASSUONI, 2013)
1815	Basalto	(VELEZ, 2010)
1704-1773	Granito	(PUTMAN & NEPTUNE, 2011)
1637-1874	Calcário	(IBRAHIM <i>et al.</i> , 2014)
1189-1829	Argila-Basalto	(KIM & LEE, 2010)
1680-1820	Calcário	(THO-IN <i>et al.</i> , 2012)
1734-2240	Basalto	(LIAN <i>et al.</i> , 2011)
558-775	Diatomita-pedra pomes	(ZAETANG <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: o próprio autor

Conclui-se pelo Quadro 2.2 que um dos fatores que influencia diretamente a massa específica em estado fresco é o tipo de agregado, como pode ser verificado para o caso do granito que teve valores de 2002 kg/m³ e no caso da pedra pomes atingiu um valor de 558 kg/m³. Destaca-se que a variação entre os granitos deve ser pelo arranjo granulométrico e a sua porcentagem.

2.2.5 Porosidade

A porosidade no concreto poroso é calculada pela porcentagem de vazios interna do material.

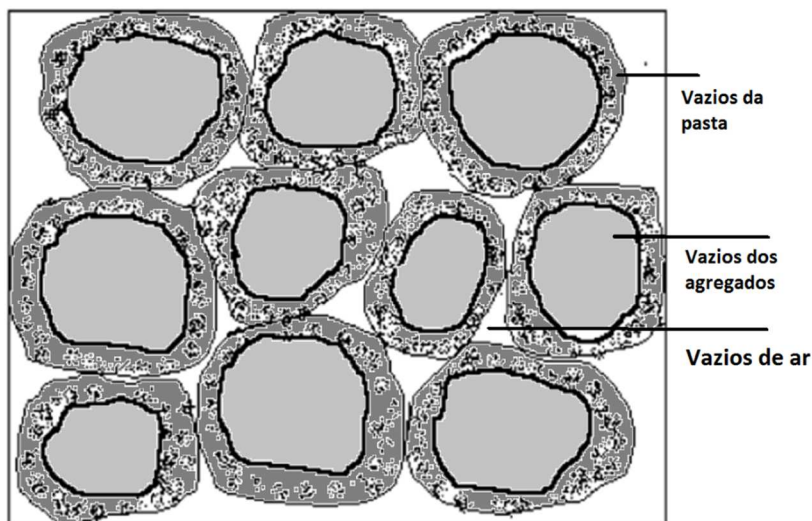
Normalmente, o concreto poroso apresenta de 10 a 35% de vazios, os quais podem ser ou não interconectados, sendo os vazios interconectados diretamente relacionados com o coeficiente de permeabilidade k (TENNIS *et al.*, 2004; NEPTUNE & PUTMAN, 2010; BHUTTA *et al.*, 2013).

A porcentagem de vazios depende da composição granulométrica, da dosagem, e do método de compactação que levará a uma acomodação específica dos grãos dos agregados na mistura (TENNIS *et al.*, 2004).

Para Aoki (2009) o concreto poroso tem três tipos de vazios: os vazios próprios da pasta de cimento, que existem tanto em concreto poroso quanto em

concreto convencional; os vazios dos agregados; e os vazios de ar (bolhas de ar) formados entre os pontos de contato dos grãos dos agregados, sendo estes os mais importantes na permeabilidade. Este tipo de vazios está diretamente ligado à granulometria, à compactação e à forma do agregado. Em 2002 Yang e Jiang tinham definido esses mesmos três tipos de vazios como mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Tipos de vazios no concreto poroso



Fonte: Yang & Jiang (2002)

Como pode ser analisado na Figura 2.1 os vazios de ar tem um tamanho representativo por tanto sua medição é indispensavel para poder correlacionar a permeabilidade e a porcentagem de vazios do concreto. Esta medição, segundo as pesquisas pode ser teórica ou direta.

2.2.5.1 Medição dos vazios

A medição dos vazios do concreto poroso pode ser feita das seguintes formas: em estado endurecido conforme as equações 2.1 e 2.2 para ter um valor aproximado.

No estado endurecido Sata *et al* (2013) propôs a Equação 2.1.

Equação 2.1 – Medição dos vazios em estado endurecido

$$V = \left[1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{P_w * Vol} \right) \right] * 100$$

Em que:

V= Porcentagem de vazios (%)

W₁= Peso imerso da amostra

W₂= Peso da amostra saturada

P_w= Densidade da água

Vol= Volume da amostra

Além da Equação 2.1, pesquisas vêm utilizando a relação entre a massa específica teórica e a massa unitária medida no material para ter uma aproximação dos vazios do material em estado fresco, como mostrado na Equação 2.2 (MAHBOUB *et al.*, 2009).

Equação 2.2 – Medição teórica dos vazios

$$V = 100 + \left[1 - \left(\frac{\text{Massa Unitária medida}}{\text{Massa Unitária específica}} \right) \right]$$

Em que:

V= Porcentagem de vazios (%)

MU= Massa Unitária dos agregados

ME= Massa unitária específica medida em estado fresco

Medição direta:

A medida dos vazios do concreto poroso de forma direta pode ser realizada envolvendo as amostras em uma membrana impermeável pela lateral e a parte inferior, depois disso adicionar um volume de água até preencher a totalidade dos vazios internos do material e finalmente fazer uma equivalência desse volume de água para obter um volume de vazios aproximado (NEITHALATH *et al.*, 2010).

Muitos pesquisadores recomendam fazer a medição dos vazios em estado endurecido utilizando a lei do empuxo (princípio de Arquimedes), na qual “Todo corpo imerso em um fluido em repouso sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo” (CASTRO *et al.*, 2009; GHAFoori & DUTTA, 1995).

Finalmente a porcentagem de vazios em estado endurecido pode ser calculada mediante o uso da máquina de Corelok® mostrada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Máquina Corelok para medição de vazios em estado endurecido



Fonte: INSTROTEK INC (2012)

Esta máquina foi feita para avaliar várias propriedades das misturas asfálticas, tais como a massa unitária e a massa específica, entre outras. Tendo entre essas propriedades os vazios do material. Este equipamento dá uma medida precisa dos vazios interconectados, que são os vazios diretamente relacionados com a permeabilidade. O uso adequado da máquina pode ser observado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Procedimento de instalação de amostras na máquina CoreLok



Fonte: INSTROTEK INC (2012)

Como mostrado na Figura 2.3, Instrotek (2011) estabelece o seguinte processo de ensaio para medir a porosidade nas amostras, sejam de asfalto ou de concreto:

1. Inserir as placas de enchimento na câmara de vácuo. Uma placa é suficiente para amostras 150 mm de altura.
2. Coloque placa de deslizamento na parte de trás da câmara por cima das placas de enchimento. Verifique se as tiras de borracha estão voltadas para cima e o lado liso está descansando na placa de enchimento.
3. Selecione uma sacola de ensaio e inspecione que a mesma não tem aberturas ou buracos que possam alterar o resultado da medição.
4. Pesar a amostra seca.
5. Coloque a sacola na CoreLok sobre a placa de deslizamento.
6. Coloque a amostra na sacola.
7. Coloque a sacola por cima da placa de deslizamento. Certifique-se que a sacola foi fechada corretamente
8. Feche a caixa e espere 3 segundos.
9. Execute a operação de vácuo e selagem.
10. Remova cuidadosamente a amostra selada tomando cuidado para não perfurar o sacola.

Finalmente o cálculo da porcentagem de vazios é feito mediante a Equação 2.3.

Equação 2.3 – Calculo dos vazios usando a máquina CoreLok

$$\Phi = \frac{SG2 - SG1}{SG2} * 100$$

Em que:

Φ = Porcentagem de vazios (%)

SG1 = Massa unitária medida no material em estado endurecido

SG2 = Massa unitária calculada com os agregados

No Quadro 2.3 se apresenta um resumo dos resultados encontrados por diferentes autores para porcentagem de vazios em concreto poroso.

A partir da análise do Quadro 2.3 conclui-se, de maneira geral, que a porcentagem de vazios normalmente oscila de 10 a 35 %. Destacando que no concreto poroso a porcentagem de vazios (%) vai depender da granulometria e do método de compactação (BHUTTA *et al.*, 2012; PUTMAN & NEPTUNE, 2011).

Quadro 2.3 - Porcentagem de vazios (%) nas pesquisas estudadas

Vazios (%)	Referência Bibliográfica
20 - 30	(HUANG <i>et al.</i> , 2010)
21,7 - 27,4	(SATA <i>et al.</i> , 2013)
18 - 22	(NEITHALATH <i>et al.</i> , 2010)
20 - 30	(ZHIFENG <i>et al.</i> , 2008)
19 - 30	(MAHBOUB <i>et al.</i> , 2009)
16 - 28,5	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
10 - 30	(CASTRO <i>et al.</i> , 2009)
10 - 20	(MERIGHI <i>et al.</i> , 2007)
10 - 20	(SONEBI & BASSUONI, 2013)
13 - 37	(KEVERN <i>et al.</i> , 2009)
7 - 24	(VÉLEZ, 2010)
15 - 25	(CHEN <i>et al.</i> , 2013)
10 - 30	(GAEDICKE <i>et al.</i> , 2013)
15 - 25	(CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> , 2008)
20 - 29	(COLERI <i>et al.</i> , 2013)
15 - 36	(PUTMAN & NEPTUNE, 2011)
18 - 25	(AGAR OZBEK <i>et al.</i> , 2013)
9 - 29	(HESAMI <i>et al.</i> , 2014)
15 - 30	(BHUTTA <i>et al.</i> , 2013)
31 - 40	(IBRAHIM <i>et al.</i> , 2014)
6 - 22	(KIM & LEE, 2010)
18 - 27	(AGAR OZBEK <i>et al.</i> , 2013)
20 - 30	(DONG <i>et al.</i> , 2013)
20 - 30	(WU <i>et al.</i> , 2011)
16 - 26	(SHU <i>et al.</i> , 2011)
20 - 30	(KAYHANIAN <i>et al.</i> , 2012)
28,7 - 34,4	(THO-IN <i>et al.</i> , 2012)
19 - 27	(SUMANASOORIYA & NEITHALATH, 2011)
22 - 27	(BHUTTA <i>et al.</i> , 2013)
15,6 - 31,8	(ZAETANG <i>et al.</i> , 2013)
39 - 44	(KUO <i>et al.</i> , 2013)
31 - 35	(NGUYEN <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: o próprio autor

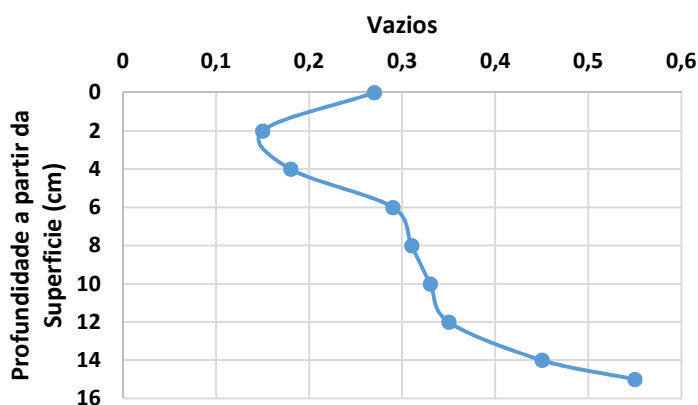
Porém muitos autores falam que não existe um valor absoluto de porcentagem de vazios já que esta propriedade pode sofrer variações no sentido vertical dependendo da granulometria e do arranjo dos grãos do agregado depois do processo de compactação.

2.2.5.2 Variação dos vazios no sentido vertical

Quando se calcula, seja teoricamente ou diretamente, a porcentagem de vazios no concreto poroso, se considera que dita porcentagem é uniforme na amostra avaliada, mas nem sempre é assim. A estrutura interna do concreto poroso pode apresentar mais de uma porcentagem de vazios no perfil vertical. Essa variação de porosidade leva a um grande erro no cálculo da permeabilidade, isto é, dentro de um mesmo corpo de prova a permeabilidade pode variar significativamente, muitas vezes diminuindo os valores finais desta propriedade (MARTIN III *et al.*, 2014).

Na Figura 2.4, pode ser observada a variação dos vazios com a profundidade segundo a pesquisa feita por Martin III *et al* (2014).

Figura 2.4 – Variação da porosidade com a profundidade



Fonte: Martin III *et al.* (2014)

A Figura 2.4 apresenta um perfil vertical com a variação da porosidade. Se pode analisar que, nessa pesquisa, quanto mais profundo os vazios aumentam em comparação com a superfície. Essa variação depende em grande parte da forma dos grãos dos agregados, da proporção de pasta na mistura e do método de compactação aplicado (MARTIN III *et al.*, 2014).

Finalmente, a porcentagem de vazios foi calculada a partir da média das porosidade encontradas no perfil vertical.

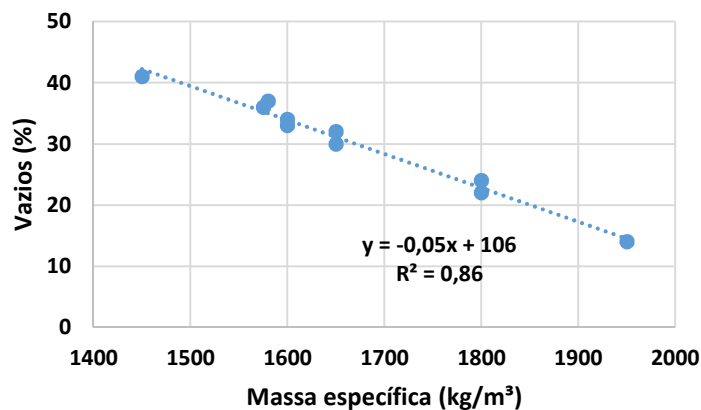
Dependendo da granulometria do agregado, a porosidade pode variar, isto é, quando se possui uma granulometria uniforme, que só tem um tamanho de grãos, é possível obter uma maior porcentagem de vazios de maior dimensão.

Vazios de maior tamanho podem facilitar o surgimento de conexões pontuais entre os agregados, o que leva a valores mais altos de permeabilidade (MARTIN III *et al.*, 2014).

Martin III *et al.*, (2014) concluíram que, para obter um valor efetivo de permeabilidade, é necessário estudar a distribuição vertical dos vazios, e assim gerar um valor mais preciso. Já que quando se trabalha com os vazios médios se estão levando em conta também aqueles vazios que não são interconectados, por tanto, teria um erro na correlação que eles tem com a permeabilidade.

Outras pesquisas têm tentado estabelecer a correlação entre a porcentagem de vazios e a massa unitária do material em estado endurecido; como resultado, tem-se constatado que podem ter uma relação linear e também um comportamento inversamente proporcional. Assim, quanto maior a porcentagem de vazios menor a massa específica em estado endurecido, como pode ser visualizado na Figura 2.5 (PUTMAN & NEPTUNE, 2011).

Figura 2.5 – Relação dos vazios com a massa específica do material



Fonte: Putman & Neptune (2011)

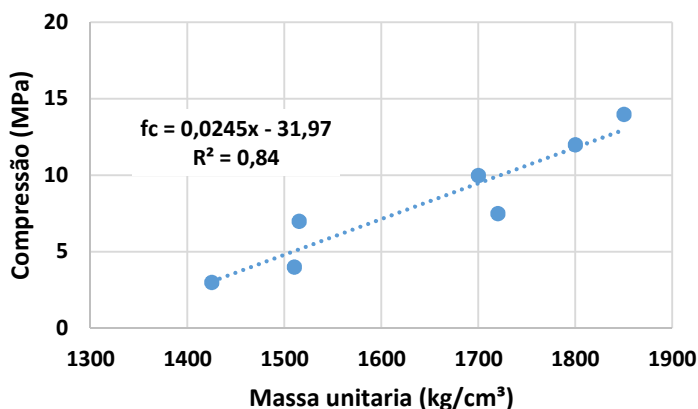
Como pode ser analisado na Figura 2.5, quanto maior é a porcentagem de vazios menor é a massa unitaria, e a porcentagem de vazios esta relacionada por sua vez com a granulometria onde uma granulometria continua resulta em uma maior porcentagem de vazios.

2.2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro importante para definir as possíveis aplicações do concreto. Muitos autores afirmam que essa propriedade está relacionada à granulometria do agregado, à dosagem, ao método de compactação, aos aditivos utilizados e às possíveis adições que possam contribuir para melhorar o comportamento do concreto (TENNIS *et al.*, 2004; GHAFoori & DUTTA, 1995; HUANG *et al.*, 2010; CHOPRA *et al.*, 2007).

Sata *et al.*, (2013) estabelecem uma relação linear entre a resistência à compressão e a massa unitária do material, e concluem que, com uma maior massa unitária a resistência à compressão do material aumenta, como pode ser observado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Variação da resistência a compressão com o aumento da massa unitária



Fonte: Sata *et al.* (2013)

Neptune & Putman (2010) relacionam a resistência à compressão diretamente com o coeficiente de uniformidade (C_u) dos agregados, conforme a Equação 2.4.

Equação 2.4 – Coeficiente de uniformidade

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Em que:

C_u = Coeficiente de uniformidade

D60= é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas.

D10= é o diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas.

Este coeficiente pode ter os seguintes valores:

Intervalo: $Cu < 5$ - muito uniforme

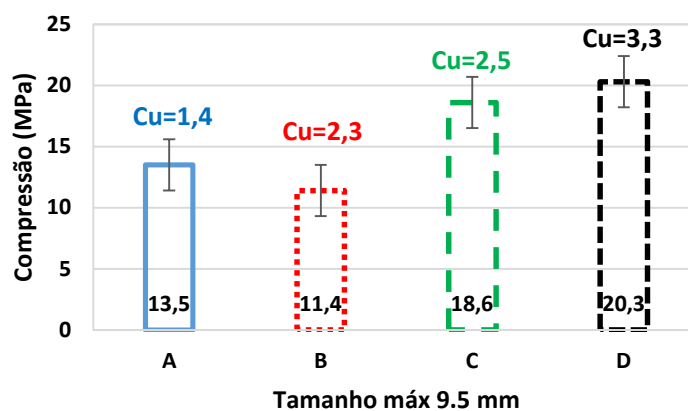
$5 < Cu < 15$ - uniformidade média

$Cu > 15$ - não uniforme

Isto é, quando muito uniforme predominam grãos de mesmo tamanho e quando $Cu > 15$ haverá grãos de diferentes tamanhos dentro da composição.

Em geral as observações apontam que, quanto maior o coeficiente de uniformidade, maior será o travamento entre grãos, o que gera mais pontos de contato e, com isso, apresenta uma melhor resposta mecânica, como mostrado na Figura 2.7 (NEPTUNE & PUTMAN, 2010).

Figura 2.7 – Relação da resistência à compressão e o coeficiente de uniformidade Cu

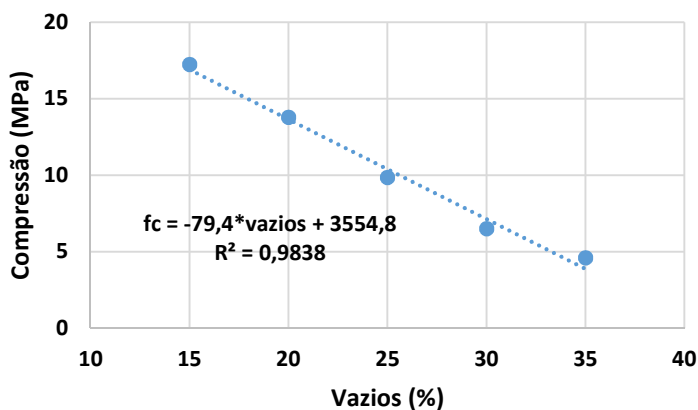


Fonte: Neptune & Putman (2010)

A partir da Figura 2.7 se conclui que quando o Cu foi maior as resistências a compressão melhoram quando comparados aos Cu de menor valor. O objetivo da pesquisa de Neptune & Putman (2010) foi identificar a influência da granulometria no desempenho do concreto poroso. Assim trabalharam com composições granulométricas diferentes chegando à conclusão que, quanto menor for o tamanho dos grãos e o Cu for mais próximo de 5 o material pode alcançar uma resistência maior.

Kevern *et al.* (2009) estabelecem uma relação linear entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios no concreto poroso. Na Figura 2.8 pode ser analisada a relação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios, sendo que, quanto menores os vazios internos do material, maiores as resistências mecânicas.

Figura 2.8 – Correlação da resistência à compressão e os vazios no concreto poroso

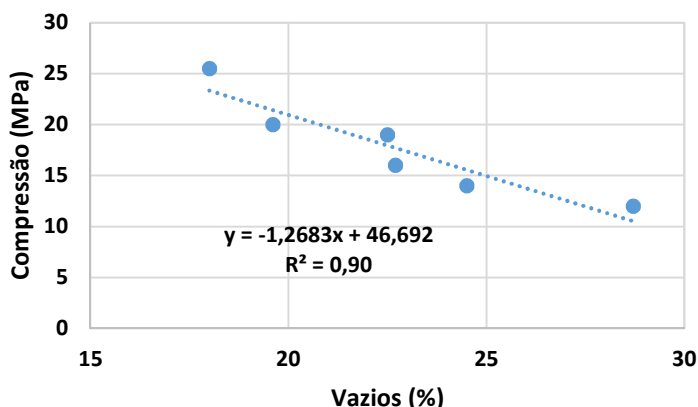


Fonte: Kevern *et al.* (2009)

Na Figura 2.8 se interpreta que a resistência à compressão é diretamente proporcional a resistência à tração e estas duas propriedades mecânicas são contrárias a porcentagem vazios. Os vazios diminuem os pontos de contato entre os grãos portanto, a dissipação de esforços não é tão efetiva, tendo uma queda representativa quando a porcentagem de vazios aumenta.

Bhutta *et al.* (2013) observaram também, que no concreto poroso, se apresenta uma relação linear entre a resistência à compressão e os vazios do material. Isto é, quanto maior a porcentagem de vazios menor a resistência à compressão do material como se pode ver na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Correlação entre resistência a compressão e os vazios no concreto poroso



Fonte: Bhutta *et al.* (2013)

Na Figura 2.9 observa-se que a correlação estabelecida por Bhutta *et al.* (2013) é linear concordando com Keven *et al.* (2009). Mas na verdade isso não acontece, já que isso poderia ser interpretado que em algum momento se chegaria numa resistência máxima para o concreto poroso. Quer dizer, se trabalharia como um material ideal. Essas duas propriedades tem uma correlação de tipo exponencial já que a curva nunca vai cruzar nenhum dos dois eixos.

Nas pesquisas citadas nas (Figuras 2.6, 2.7, 2.8, 2.9), foram encontrados diferentes valores de resistência à compressão. A variação desta propriedade se explica em função da dosagem utilizada, dos métodos de compactação e dos diferentes tipos de agregados, assim como sua composição granulométrica. No Quadro 2.4 podem ser analisadas as resistências médias encontradas nas diferentes pesquisas relacionadas com concreto poroso.

Quadro 2.4 - Valores da resistência à compressão nas diferentes pesquisas do mundo

Compressão (MPa)	Referências Bibliográficas
5 - 15	(HUANG <i>et al.</i> , 2010)
11,9 - 13,6	(SATA <i>et al.</i> , 2013)
5,22 - 6,71	(ZHIFENG <i>et al.</i> , 2008)
6 - 19	(MAHBOUB <i>et al.</i> , 2009)
11 - 20	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
20,1 - 32,1	(MERIGHI <i>et al.</i> , 2007)
7,1 - 13,8	(YANG & JIANG, 2002)
> 32	(CHEN <i>et al.</i> , 2013)
5 - 26	(GAEDICKE <i>et al.</i> , 2014)
13 - 22	(CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> , 2008)

Compressão (MPa)	Referências Bibliográficas
14 - 21	(HESAMI <i>et al.</i> , 2014)
10 - 25	(BHUTTA <i>et al.</i> , 2012)
6,95	(IBRAHIM <i>et al.</i> , 2014)
1,5 - 15	(KIM & LEE, 2010)
24 - 50	(AGAR-OZBEK <i>et al.</i> , 2013)
8 - 15	(DONG <i>et al.</i> , 2013)
14 - 25	(WU <i>et al.</i> , 2011)
15	(GUPTA, 2014)
15 - 50	(SHU <i>et al.</i> , 2011)
5,4 - 11,4	(THO-IN <i>et al.</i> , 2012)
6,9 - 20,6	(SUMANASOORIYA & NEITHALATH, 2011)
7,5 - 16	(BHUTTA <i>et al.</i> , 2013)
11,5 - 49	(LIAN <i>et al.</i> , 2011)
2,47 - 5,99	(ZAETANG <i>et al.</i> , 2013)
4 - 12	(KUO <i>et al.</i> , 2013)
10,5 - 16,3	(NGUYEN <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: o próprio autor

Do Quadro 2.4 conclui-se que há uma faixa de valores em que a resistência à compressão varia desde 2,47 até 50 MPa, dando uma ideia do potencial que tem este tipo de material para ser utilizado em muitas aplicações.

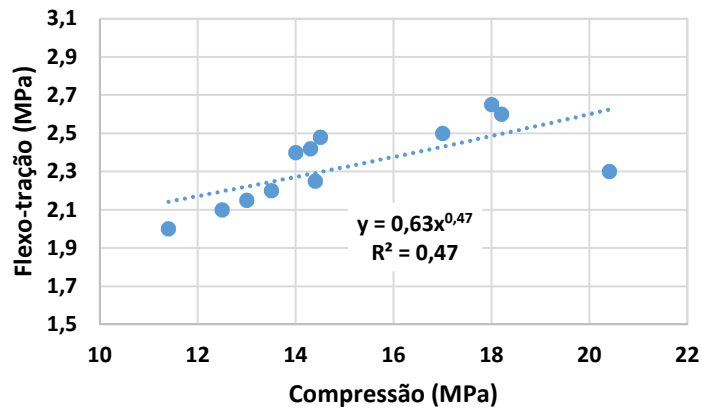
2.2.7 Resistência à flexo-tração

Um dos parâmetros mecânicos importantes para usar o material em calçadas ou em pavimentação e a resistência a flexo-tração, que finalmente vai ser suportada pelas ligações entre os grãos do material.

Neptune & Putman (2010) tentaram correlacionar a resistência à flexo-tração e a resistência à compressão. Essa correlação foi feita mediante uma equação exponencial, onde as duas propriedades se mostraram diretamente proporcionais. Quanto maior a resistência à compressão, maior a resistência à flexo-tração, como pode ser visto na Figura 2.10.

Da Figura 2.10 pode ser observado que o coeficiente de correlação encontrado foi de 0,47, indicando que tal tendência não é a mais adequada para estes dois parâmetros, para os dados analisados. Porque na compressão vai prevalecer o tipo de agregado e na flexo-tração vai importar a granulometria, o conteúdo de finos e o tipo de compactação

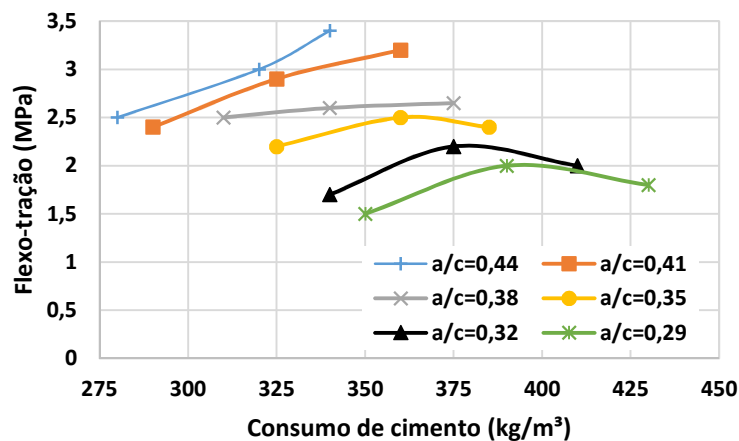
Figura 2.10 – Relação da resistência à compressão e a resistência à flexo-tração



Fonte: Neptune & Putman (2010)

Castro *et al.* (2009) avaliaram a resistência à flexo-tração para diferentes consumos de cimento e diferentes relações água cimento (a/c). Com os resultados, foi possível definir o comportamento das diferentes misturas. Na Figura 2.11 se pode observar que os resultados obtidos por eles apresentam uma tendência quadrática e podem, assim, definir uma dosagem ótima.

Figura 2.11 – Relação da resistência à compressão com o consumo de cimento e a relação a/c



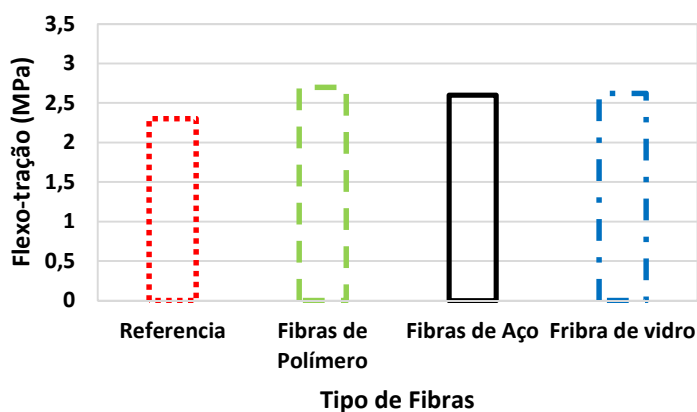
Fonte: Castro *et al.* (2009)

Verifica-se pela Figura 2.11 que relações a/c inferiores a 0,32 não são recomendadas, devido à diminuição da resistência mecânica neste tipo de material. Essa observação é contrária ao comportamento do concreto convencional, em que diminuir a relação a/c leva a um aumento na resistência final do material. Porque neste tipo de concreto altos consumos de cimento aumentam o espaço entre os grãos,

portanto, leva a uma diminuição de resistência nas uniões e na travacão dos grãos, explicando assim a queda na resistência final do material.

Hesami *et al.* (2014) melhoraram a resposta mecânica do concreto poroso adicionando diferentes tipos de fibras na mistura, como pode ser observado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Relação da resistência à flexo-tração com as diferentes fibras



Fonte: Hesami *et al.* (2014)

Da Figura 2.12 se pode concluir que as fibras ajudam a melhorar mais a resistência à flexo-tração são as fibras de polímero devido a sua melhor ancoragem no interior do material assim como sua melhor distribuição na produção do concreto.

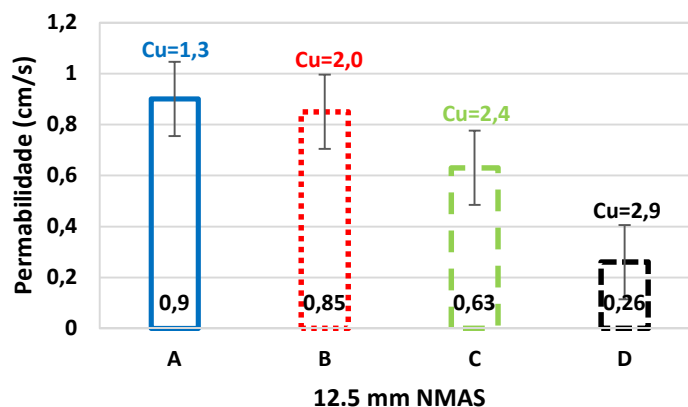
2.2.8 Permeabilidade

A função principal do concreto poroso é facilitar o escoamento da água pela sua estrutura. Logo a sua propriedade principal é a permeabilidade, que vai depender da granulometria dos agregados utilizados e da compactação do material.

Na medição da permeabilidade, a maioria das pesquisas têm implementado ensaios de carga constante e de carga variável com grandes diferenças quanto aos seus valores finais (TENNIS, *et al.*, 2004; LI, *et al.*, 2012).

Neptune & Putman (2010) estabelecem a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o Cu que depende diretamente da estrutura granulométrica do agregado utilizado, como se pode visualizar na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Relação entre a permeabilidade e o coeficiente de uniformidade CU



Fonte: Neptune & Putman (2010)

Conforme a Figura 2.13 Neptune & Putman determinam que, quanto maior o coeficiente de uniformidade menor é a permeabilidade. Quer dizer se o coeficiente de uniformidade for muito alto a composição granulométrica dos grãos vai ter mais de um tamanho, por tanto quanto maior for este coeficiente a granulometria vai ser mais contínua e diminuirá esta propriedade.

Nas pesquisas realizadas, basicamente se encontram dois métodos de ensaio de permeabilidade: o ensaio de carga constante e o ensaio de carga variável; cada um deles permite ter uma aproximação do coeficiente de permeabilidade do material como mostrado no Quadro 2.5.

No Quadro 2.5 torna-se claro que, dependendo do método de medição desta propriedade, os resultados são diferentes. Portanto, é necessário avaliar se entre os diferentes métodos existentes, pode chegar a existir uma correlação que possa garantir que os resultados sejam confiáveis.

Quadro 2.5 -- Valores do coeficiente de permeabilidade k nas diferentes pesquisas no mundo

Coeficiente de Permeabilidade K (mm/s)	Ensaio	Referências Bibliográficas
1,3 – 4	Constante	(LI, <i>et al.</i> , 2012)
3,8 - 19,9	Variável	(LI, <i>et al.</i> , 2012)
10 – 20	Constante	(HUANG, <i>et al.</i> , 2010)
7,1 – 12	Constante	(SATA, <i>et al.</i> , 2013)
27 - 46,7	Constante	(ZHIFENG, <i>et al.</i> , 2008)
0,243 - 0,269	Constante	(MAHBOUB, <i>et al.</i> , 2009)
1 – 9	Variável	(NEPTUNE & PUTMAN, 2010)
0,027 - 0,089	Variável	(MERIGHI, <i>et al.</i> , 2007)
1,7 - 34,7	Variável	(YANG & JIANG, 2002)
0,35 - 14,17	Variável	(SONEBI & BASSUONI, 2013)
3 – 15	Variável	(GAEDICKE, <i>et al.</i> , 2013)
11 - 20	Constante	(COLERI, <i>et al.</i> , 2013)
0,8 - 4,8	Variável	(HESAMI, <i>et al.</i> , 2014)
2,5 – 33	Constante	(BHUTTA, <i>et al.</i> , 2012)
15,6 - 28,2	Constante	(IBRAHIM, <i>et al.</i> , 2014)
0,7 - 3,7	Variável	(WU, <i>et al.</i> , 2011)
0,3 - 3,2	Variável	(SHU, <i>et al.</i> , 2011)
0,007 - 8,2	Variável	(KAYHANIAN, <i>et al.</i> , 2012)
19,2 - 59,6	Constante	(THO-IN, <i>et al.</i> , 2012)
24 – 37	Constante	(BHUTTA, <i>et al.</i> , 2013)
3 - 47,7	Constante	(ZAETANG, <i>et al.</i> , 2013)
5 – 40	Constante	(KUO, <i>et al.</i> , 2013)
3 - 8,4	Variável	(NGUYEN, <i>et al.</i> , 2013)

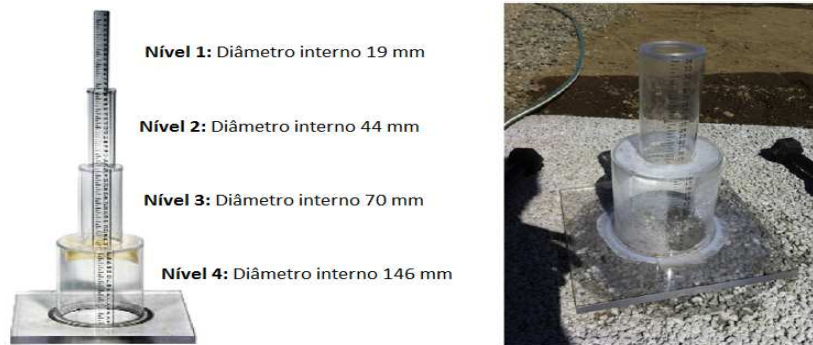
Fonte: o próprio autor

2.2.8.1 Medição em campo

Nas obras tem que ser realizados os ensaios no estado fresco, tomar as amostras para os ensaios em estado endurecido e finalmente realizar o controle de qualidade do material. Então, a medição da permeabilidade em campo é de vital importância para conhecer como vai ser o comportamento hidráulico e seu provável desempenho do concreto assim que aconteça um evento de precipitação.

Um dos equipamentos mais populares para medição da permeabilidade é o permeâmetro NCAT, desenvolvido inicialmente para avaliar a permeabilidade de asfaltos como mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Permeâmetro NCAT



Fonte: Li *et al.* (2012)

Este equipamento utiliza o princípio de um de carga variável sendo composto por 4 diâmetros diferentes, como se pode visualizar na Figura 2.14. O diâmetro menor fica no topo e o maior no final. A razão de ter 4 diâmetros diferentes é para garantir a medição tanto nos materiais pouco permeáveis quanto naqueles que têm uma permeabilidade maior (LI, *et al.*, 2012).

Outro método muito popular é o estabelecido pela ASTM C1701, que dá uma medida aproximada do coeficiente de permeabilidade. Este método utiliza o princípio do permeâmetro de carga constante, no qual se avalia o tempo para absorver um volume específico de água, mantendo uma lâmina da água de aproximadamente 1 cm. Este método utiliza um tubo de PVC de diâmetro de 30 cm que está em contato direto com a superfície permeável; o tubo é vedado à superfície para garantir a não infiltração da água no contato do tubo e a superfície, como pode ser observado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Método ASTM C1701 para medição de permeabilidade em campo



Fonte: NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (2010)

O coeficiente de permeabilidade para o método da Figura 2.15 se calcula mediante a Equação 2.5.

Equação 2.5 – Calculo da permeabilidade utilizando o método ASTM C1701

$$I = \frac{K * M}{D^2 * t}$$

Em que:

I= Coeficiente de Permeabilidade (mm/h)

M= Massa infiltrada de água (kg)

D= Diâmetro do tubo (mm)

t= Tempo necessário para absorver a água (s)

K= Constante do ensaio (4.583.666.000 para o sistema internacional e 126.870 quando for em libras por polegada)

Em campo podem ser utilizados esses dois tipos de ensaio, para medir quão permeável é o material e se vai cumprir ou não com a permeabilidade mínima para cumprir sua função principal.

Já em laboratório, atualmente, não existe uma normativa para a avaliação dessa propriedade para concretos porosos. Nesse sentido, as pesquisas realizadas vêm adaptando a Lei de Darcy com ensaios de carga constante e variável para ter uma medida aproximada da permeabilidade deste material.

2.2.9 Desgaste

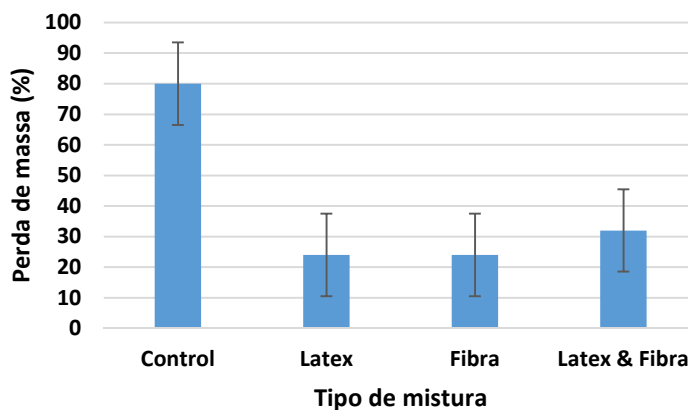
No concreto poroso uma medida dos danos causados pelo uso do material é a resistencia ao desgaste. A principal causa de desgaste no material vai ser o desprendimento e a abrasão do material por causa do seu uso nas calçadas pelo trânsito de pedestres e nos estacionamentos e vias de tráfego leve pelo movimento dos veículos. Este tipo de concreto por possuir contatos específicos entre os agregados e um grande conteúdo de vazios é susceptível ao desenvolvimento de fissuras (WU *et al.* 2011; DONG *et al.* 2013).

Diante disso, na EUROPA existe a norma NLT-362/92 que introduz o ensaio de cantabro para avaliação da perda por desgaste em misturas asfálticas.

O ensaio é usado em misturas asfálticas pelo fato de ser um material muito mais dúctil e ter correlação direta com o uso na pavimentação. Por isso, na tentativa de ter uma noção do desgaste no concreto poroso este ensaio vem sendo adaptado.

Wu *et al.* (2011) realizou uma pesquisa onde analisaram a influência da utilização de polímero e a adição de fibras no desgaste do concreto poroso com diferentes tipos de agregado, como pode ser observado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Comparação da perda de massa (%) em função do uso de látex e adição de fibra

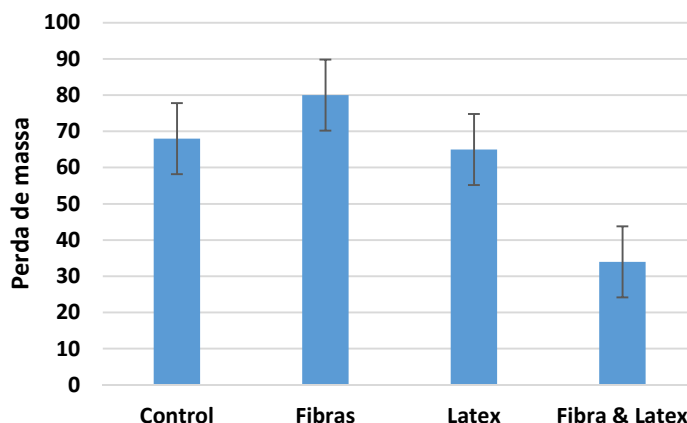


Fonte: Wu *et al.* (2011)

Da Figura 2.16 pode se concluir que o uso de polímero e fibra em misturas de concreto poroso vai diminuir de forma efetiva o desgaste no material, independentemente do tipo de agregado utilizado, alterando de forma significativa esta propriedade.

Dong *et al.* (2013) realizaram a avaliação da resistência ao desgaste pelo ensaio de cantabro encontrando que as amostras não vão sofrer um desgaste real e a perda de massa se dá basicamente pelo impacto entre a amostra e a máquina, eles avaliaram a influência da adição de fibras e o uso de polímero no desgaste encontrando os resultados mostrados na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Comparação do desgaste em função da adição de fibra e o uso de polímero



Fonte: Dong *et al.* (2013)

Na Figura 2.17 pode ser analisado que de igual forma uso de polímeros diminui o desgaste do material mais do que a adição de fibras, mas o uso destas duas alternativas vai reduzir muito o desgaste em agregados de tamanho máximo de 9,5 mm.

Finalmente o ensaio de desgaste vai mostrar o processo de deterioração deste tipo de material assim que este estiver em seu funcionamento normal.

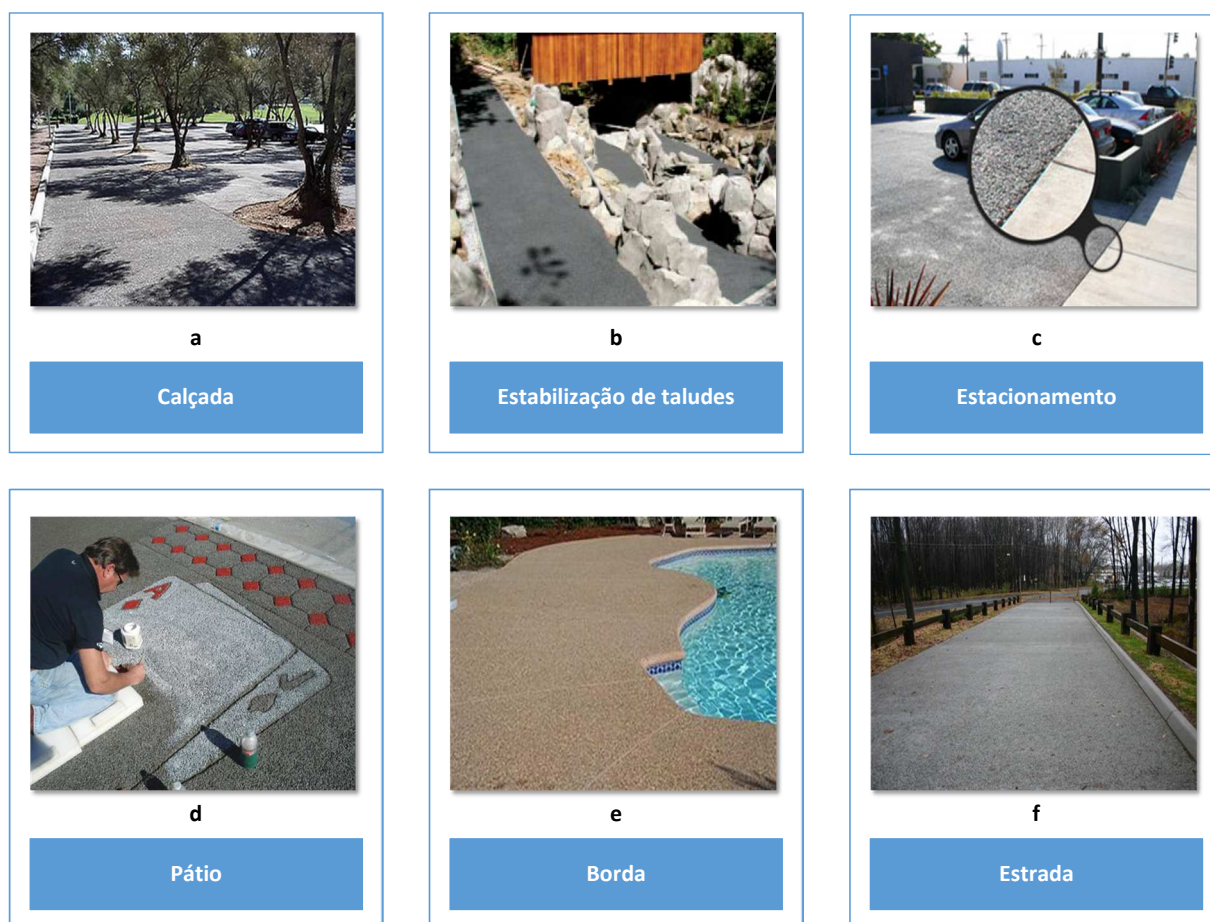
2.2.10 Aplicações

Como o concreto poroso é um material que permite a passagem da água pela sua estrutura, as principais aplicações são relacionadas a essa função. As principais aplicações do concreto poroso atualmente são (TENNIS, *et al.*, 2004):

- Calçadas: o concreto poroso é usado neste espaço público com o objetivo de permitir a passagem de água e manutenção do nível do lençol freático, além de garantir a absorção de água pelas árvores, como mostrado na Figura 2.18 a.
- Estabilização de taludes: é usado para a evacuação rápida da água na estabilização de taludes, ver Figura 2.18 b
- Estacionamentos: O concreto poroso é usado para reduzir completamente o escoamento superficial e garantir a funcionalidade deste tipo de obra, Figura 2.18 c.

- Pátios: como é um material poroso tem um atrativo especial por seu acabamento, às vezes poder ser pigmentado e decorado sem afetar suas propriedades, Figura 2.18 d.
- Bordas de piscinas: É usado para manter uma superfície livre de água nas bordas das piscinas e manter a segurança dos usuários, ver Figura 2.18 e.
- Pavimentação de vias de tráfego-leve: É usado para reduzir o escoamento superficial e evitar acidentes nos eventos de precipitação, ver Figura 2.18 f.

Figura 2.18 – Aplicações do concreto poroso



Fonte: o próprio autor

O concreto poroso, segundo vários autores (TENNIS, *et al.*, 2004; B WOODS-BALLARD, *et al.*, 2007), apresenta vantagens e desvantagens relacionadas a seguir.

Vantagens:

- Ajuda a remover os poluentes urbanos presentes no escoamento superficial;
- Reduz de forma imediata a taxa do escoamento superficial;
- Diminui as obras de sistema de coleta de águas pluviais;
- Dependendo do tipo de solo, ajuda na recarga dos aquíferos;
- Ajuda a ganhar pontos de crédito LEED (Leadership in Energy and Environment Design) na construção sustentável.

Desvantagens:

- Resistência à tração baixa;
- É usado só em estradas de tráfego leve ou calçadas;
- Baixa velocidade de operação do trânsito;
- Trabalhabilidade, isto é, o material é muito seco, apresentando tempos de trabalho rápidos;
- Não pode ter reforço em aço considerando a estrutura tão aberta, pode apresentar corrosão de armaduras de maneira muito fácil.

Finalmente, ainda se carece de estudos mais focados na reutilização de diferentes materiais na fabricação de concreto poroso assim como a medição do seu desempenho, tendo como finalidade viabilizar ou não o uso de novos materiais diferentes dos convencionais.

Um outro ponto é a comparação dos ensaios de permeabilidade de laboratório para ter um valor confiável que possa dar uma aproximação ao coeficiente de permeabilidade do material.

2.3 Materiais sustentáveis

Na atualidade, vem ganhando muita força o reaproveitamento dos diferentes resíduos na construção civil, tendo como primeiro objetivo o ganho ambiental e dar uma outra destinação a este tipo de materiais, chegando a obter resultados bons quanto a resistência e durabilidade em algumas das pesquisas realizadas.

Mas para dar um uso viável a este tipo de materiais se tem que ter um estudo real das suas propriedades e assim testar o possível potencial nas diferentes áreas de pesquisa da construção civil.

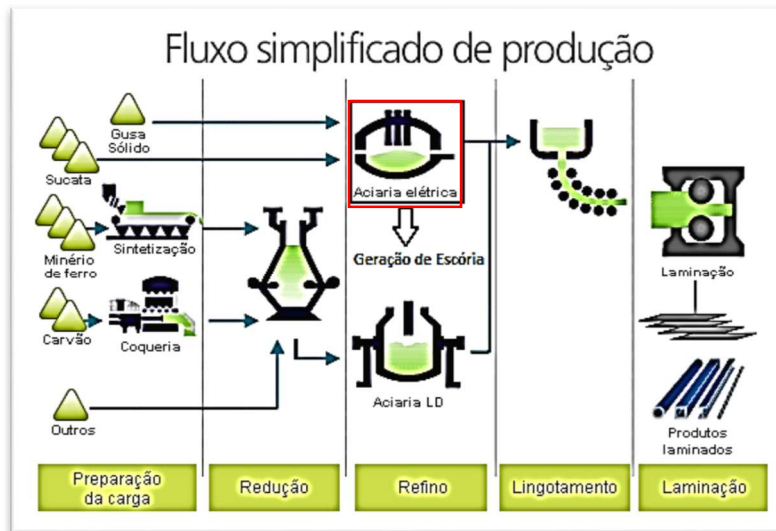
2.3.1 Escória siderúrgica

A reutilização dos resíduos é uma parte importante na sustentabilidade ambiental. Muitas vezes os resíduos gerados pelas diferentes atividades humanas não têm uso definido e simplesmente são rejeitados e encaminhados aos lixões das cidades.

Dentro dos diversos resíduos se pode destacar a escória siderúrgica, a qual é um resíduo do processo de produção de aço de segunda linha e produzido nas usinas semi-integradas. As escórias, hoje em dia, são consideradas um coproduto da produção de aço, segundo o Instituto Aço Brasil 2013, e compreendem 60 % dos coprodutos da produção de aço no Brasil.

Na Figura 2.19 se apresentam os processos de fabricação de aço no Brasil, além mostrar a origem dos agregados de escória no forno elétrico. Neste processo é reaproveitada a sucata mais o ferro gusa para a formação do aço novo os quais são processados no forno elétrico no processo de refino, para o seu posterior lingotamento e laminação.

Figura 2.19 - Processo de produção do aço no Brasil



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2009)

Geralmente, na produção de uma tonelada de aço, são produzidos 600 kg de coprodutos e resíduos dos quais 60 % são escórias, tal como mostra a Figura 2.20 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2009).

Figura 2.20 – Coprodutos gerados na produção de aço e sua aplicabilidade no Brasil



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2009)

Dependendo da sucata a escória terá variações dentro da sua composição química. Na Tabela 2.1 podem ser observadas tais variações dependendo do país.

Tabela 2.1 – Composição química das escórias siderúrgica

País	Geração (kg/t)	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0,006
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Brasil	150	33	10	18	6	30	5	-	-
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
Faixa	100-160	32-46	4-10	11-25	4-8	18-31	4-7	0,6-1,4	0,1-0,2

Fonte: Pereira (1994); Geyer *et al.* (1994)

Da Tabela 2.1 observa-se que o Brasil é um dos grandes geradores de escória siderúrgica no mundo, e quimicamente esta não tem diferença significativa quando comparada às produzidas em outros países.

As principais aplicações da escória de forno elétrico são as seguintes (ROHDE, 2002):

- Agregado graúdo da mistura asfáltica;
- Agregado para base e sub-base;
- Estabilização de solos;
- Agregado para a produção de concreto.

Na América do Sul, além do Brasil, a Colômbia é um dos países com grande produção de escória siderúrgica. A empresa DIACO é uma grande produtora de aço no âmbito nacional colombiano; sua infraestrutura consta de uma siderúrgica semi-integrada que produz aço com a sucata coletada de diferentes partes do país.

No processo da produção de aço, a empresa DIACO produz aproximadamente 4.000 toneladas de escória siderúrgica por mês, o que representa uma elevada produção deste coproduto sem uma aplicação específica (PARRA ARAQUE & SÁNCHEZ GARCÍA, 2010).

Segundo Gerdau Colômbia (2010), as escórias produzidas em suas aciarias têm as seguintes aplicações:

- Gabiões;
- Estruturas ante erosão;
- Agregado graúdo para pavimentação (Base-Sub-base);
- Lastro ferroviário;
- Revestimento de pátios;
- Tratamento de água residual.

Na Colômbia as aciarias não estão autorizadas para realizar vendas da escória siderúrgica devido a inexistência de normativa específica para o uso deste tipo de material nas obras civis. Por isso, é oferecido às prefeituras que não têm recursos suficientes para a aquisição de agregados convencionais para execução de obras de pavimentação e manutenção de estradas rurais.

Por esta razão, se considera importante desenvolver um estudo no qual se avalie as propriedades da escória e, se recomendem aplicações como agregado na produção de concreto para, assim, diminuir os impactos derivados da armazenagem e disposição inadequada deste coproduto na Colômbia.

2.3.2 Resíduos de construção civil (RCC)

Na atualidade, a reciclagem e a reutilização de resíduos de construção civil vêm tendo muita importância na redução dos impactos produzidos por esta indústria e na exploração de recursos naturais (AGRELA, *et al.*, 2012).

Na produção de concretos vem sendo estudada a redução ou substituição total dos agregados graúdos e miúdos por agregados derivados dos resíduos de construção civil.

No Brasil, a resolução CONAMA 307 estabelece os parâmetros específicos para gestão de resíduos, a qual considera de forma íntegra sua correta disposição e manejo desde seu processo de produção. Essa resolução classifica este tipo de resíduo como classe A, isto é, resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados para concretos.

A importância de dar um uso correto a este tipo de resíduos nasce dos transtornos sociais que causa sua má disposição no meio ambiente. A deterioração do ambiente e a geração de focos de contaminação como mostrado na Figura 2.21, sendo focos de doenças para a população civil em geral (PAZANI FIGUEIREDO, 2007).

Figura 2.21 – Impactos produzidos pela má disposição dos resíduos de construção civil



Fonte: SHANGHAI LIMING COMPANY (2000)

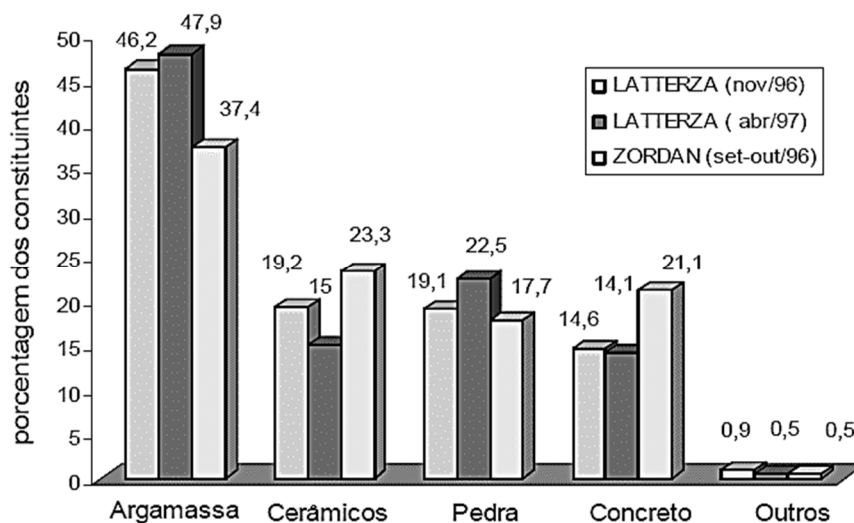
As propriedades principais a serem estudadas neste tipo de agregados são: composição granulométrica, forma e textura das partículas, massa específica e massa unitária, absorção de água, composição (que tipos de material formam o resíduo) (PAZANI FIGUEIREDO, 2007). Estas propriedades são detalhadas a seguir:

- Composição granulométrica: é influenciada basicamente pelo tipo de britador utilizado na sua produção e o sistema de processamento, isto implica de maneira direta a trabalhabilidade do material em estado fresco.
- Forma e textura das partículas: normalmente segundo o tipo de britador, as partículas são mais angulosas e mais porosas, às vezes podem apresentar partículas aderidas de outros materiais (argamassas ou concretos), influenciando na consistência final do material.
- Massa específica e massa unitária: inferior à dos materiais convencionais devido à natureza do agregado, a sua maior porosidade e a presença de materiais cerâmicos dentro da sua composição.

- Absorção de água: os resíduos têm substancialmente uma maior absorção de água do que os materiais convencionais, devido aos materiais cerâmicos e à rede de poros interconectados que tem em seu interior, o que leva a ter que fazer uma correção na relação a/c final.
- Composição: nesta propriedade estão ligadas diretamente a fonte geradora do resíduo, o tipo de tecnologia construtiva usada na fonte geradora, e, finalmente, seu sistema de processamento (se tem triagem de materiais ou não).

Segundo Pazani Figueiredo (2007) o maior componente dos RCC é argamassa seguido pelos materiais cerâmicos, pedra e concreto, como mostrado na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Materiais constituintes dos resíduos de construção civil (RCC)



Fonte: Pazani Figueiredo (2007)

Como foi constatado por Pazani Figueiredo (2007), a maior parte dos resíduos de construção civil está composta por argamassas, seguida de materiais cerâmicos e finalmente concretos; portanto, para dar um destino viável a este tipo de material, é importante fazer uma triagem inicial para obter uma homogeneização de cada material.

No mundo, nos últimos 4 anos, vem tomando importância o estudo das diferentes aplicações dos RCC como agregados para produção de concretos e

de camadas granulares para pavimentos. O Quadro 2.6 mostra os diferentes usos do RCC.

Quadro 2.6 - – Pesquisas feitas no mundo nos diferentes usos do RCC

Foco de Estudo	Referência	País
Usos do RCC	(Blengini & Garbarino, 2010)	Itália
Pavimentos	(Agrela, et al., 2012)	Espanha
Concreto	(Pazani Figueiredo, 2007)	Brasil
Agregados Sustentáveis	(Blengini, et al., 2012)	Europa
Concreto	(Marie & Quiasrawi, 2012)	Jordânia
Concreto	(Mefteh, et al., 2013)	Argélia
Concreto	(Ulloa, et al., 2013)	Espanha
Pavimentos	(Barbudo, et al., 2012)	Espanha e China
Concreto	(Kou, et al., 2012)	China
Concreto Poroso	(Sata, et al., 2013)	Tailândia

Fonte: o próprio autor

Do Quadro 2.6 observa-se que o RCC tem potencial de pesquisa no desenvolvimento de concretos, e no caso do concreto poroso são agregados idôneos já que em princípio não se busca a obtenção de resistência elevadas, mas sim de boa permeabilidade.

Finalmente o desenvolvimento de pesquisas que possam dar uma alternativa do uso deste tipo de resíduo em concretos é uma alternativa viável visando obter boas propriedades em estado fresco e um desempenho aceitável entendendo as limitações que este tipo de material apresenta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, primeiramente serão apresentados os materiais e métodos usados durante a primeira campanha experimental, realizada com o propósito de fixar a granulometria a ser usada no trabalho. Sendo a segunda campanha experimental, baseada na análise do uso de agregados graúdos sustentáveis para a produção do concreto poroso assim como a implementação da medição de vazios em estado fresco, a permeabilidade a carga constante e a resistência ao desgaste do material.

3.1 Primeira Campanha experimental

O objetivo desta campanha foi selecionar a granulometria ideal para produzir concreto poroso levando em conta tanto as propriedades mecânicas as hidráulicas e finalmente o acabamento. Os materiais utilizados ao longo desta campanha foram:

- Cimento Portland- CP II-F-32 composto com adição de filer calcário na proporção de 6 a 10%.
- Agregado graúdo de basalto de dimensão máxima 9,5 mm (brita zero – B0) e 19 mm (brita um – B1) da região de Londrina (Paraná), as quais foram caracterizadas segundo as normas específicas.
- Água potável.

3.1.1 Caracterização dos agregados graúdos

Os resultados da caracterização dos agregados graúdos se encontram na Figura 3.1 e nas Tabelas 3.1 e 3.2. Na Figura 3.1 é possível observar a curva granulométrica da brita zero (B0), brita um (B1) e da combinação B0 e B1(50/50). Tal combinação foi escolhida no intuito de melhorar a distribuição dos grãos de forma contínua usando as duas britas mencionadas anteriormente.

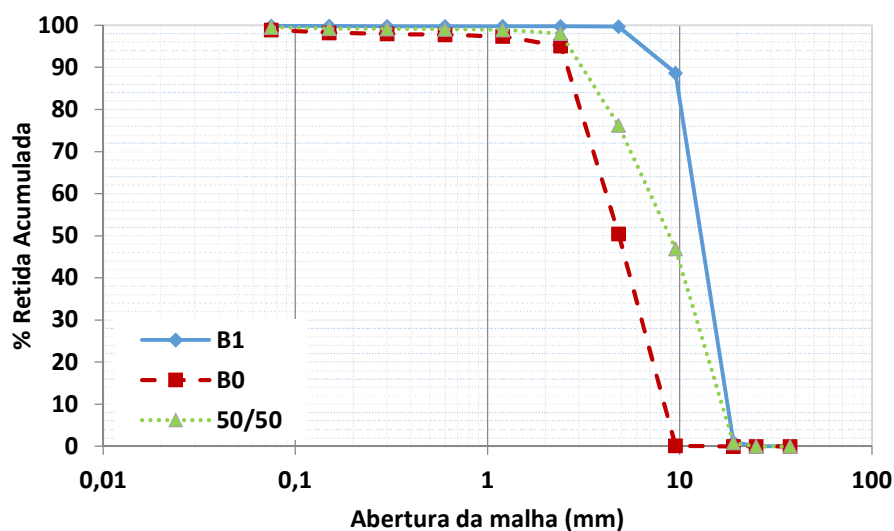
Na Tabela 3.1 se apresenta a análise granulométrica das britas utilizadas na campanha experimental 1 realizada mediante a norma NBR NM 248/2003.

Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados graúdos da primeira campanha

Tipo de Brita	B0		B1		50/50	
Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
37,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	1,00	1,00	0,83	0,83
9,5	0,17	0,17	87,68	88,68	46,10	46,94
4,8	50,35	50,51	11,00	99,69	29,34	76,27
2,4	44,59	95,11	0,09	99,78	21,81	98,08
1,2	2,27	97,37	0,00	99,78	0,88	98,96
0,6	0,40	97,77	0,01	99,79	0,14	99,10
0,3	0,23	98,00	0,01	99,79	0,08	99,18
0,15	0,25	98,25	0,01	99,80	0,08	99,26
FUNDO	1,03	100,00	0,16	100	0,45	100
D60	5,50		14,00		11,00	
D10	2,50		9,00		3,20	
Cu	2,20		1,56		3,44	
Dimensão máxima característica (mm)	9,5		19		19	
Módulo de Finura	6,36		7,88		7,18	

Fonte: o próprio autor

Figura 3.1 – Curvas granulométricas B0, B1 e 50/50



Fonte: o próprio autor

Observa-se na Figura 3.1, a brita B0 possui granulometria descontínua, tendo dois tamanhos de grãos só na sua composição, com coeficiente de uniformidade Cu de 2,2. A brita B1 apresenta um Cu de 1,56 o que indica que é mais uniforme do que a B0, apresentando só um tamanho de grão, por tanto, é uma

granulometria uniforme. Já a combinação das britas B0 e B1 apresenta uma distribuição mais contínua constatada pelo Cu de 3,44, apresentando vários tamanhos de grãos dentro da sua composição.

Entendendo como granulometria contínua aquela que tem vários tamanhos de grãos, granulometria uniforme a que só tem um tamanho de grão e finalmente granulometria descontínua tem uma faixa incompleta de grãos.

Os resultados dos demais ensaios de caracterização realizados no agregado graúdo, assim como suas respectivas normas, se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo

Tipo de Brita	NBR NM 53/2003 Massa Específica (g/cm ³)	NBR 7251/1982 Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 46/2003 Teor de Material pulverulento (%)	NBR NM 53/2003 Absorção de água (%)
B0	2,80	1,50	4,15	1,42
B1	2,80	1,67	2,55	1,20
50/50	2,80	1,61	3,35	1,31

Fonte: o próprio autor

Da Tabela 3.2 pode-se concluir que não teve muita variação em parâmetros como a massa específica a massa unitária e a absorção devido a que as três granulometrias utilizadas eram do mesmo tipo de material, o basalto. O teor de material pulverulento variou de acordo ao conteúdo de finos próprio de cada granulometria.

3.1.2 Métodos

3.1.2.1 Dosagem

Para esta campanha foi utilizado o traço em massa, 1:3,26 com uma relação água cimento (a/c) de 0,34, o mesmo foi utilizado na pesquisa de Veléz (2010), na Colômbia.

O trabalho de Velez (2010) avaliou as propriedades mecânicas mas não as hidráulicas. Assim, no intuito de melhorar e refazer os resultados obtidos por este autor, se decidiu trabalhar com o traço em massa fixado por ele. Este apresenta um consumo de cimento de 420 kg/m³. Destaca-se que não foi utilizado aditivo químico e nem adição mineral na realização deste traço. O consumo de materiais pode ser observados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Consumo de materiais por m³ da primeira campanha experimental

Tipo de agregado	Consumo cimento (kg)	Consumo de agregado (kg)	a/c	Água (l)	Absorção do agregado (%)	Água de absorção (l)	Correção da água de amassamento (l)
B0	420	1369,2	0,34	142,8	1,2	16,43	159,23
B1	420	1369,2	0,34	142,8	1,42	19,44	162,24
50/50	420	1369,2	0,34	142,8	1,31	17,94	160,74

Fonte: o próprio autor

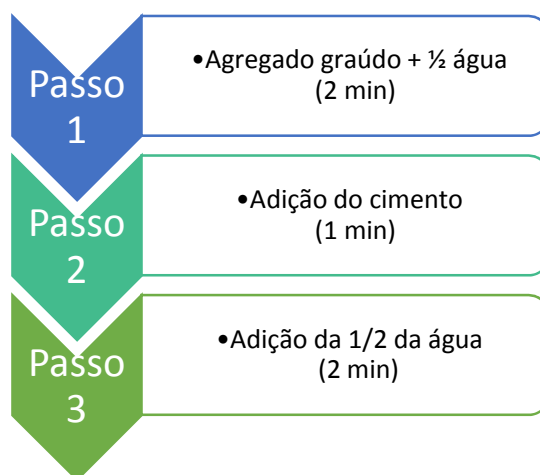
3.1.2.2 Produção do concreto

A seguir será explicado o processo de produção do concreto poroso, tal produção é dividida em sequência de mistura, método de adensamento e cura.

3.1.2.3 Mistura

Durante a primeira campanha experimental o processo de produção do concreto poroso teve a sequência mostrada na Figura 3.2, tendo como tempo final de mistura 5 minutos.

Figura 3.2 Processo de produção do concreto



Fonte: o próprio autor

O tempo de mistura de 5 minutos foi derivado de um estudo prévio neste trabalho onde se trabalhou com 3, 5 e 7 minutos e verificou-se que 5 minutos era o suficiente para obter uma consistência adequada e uma trabalhabilidade boa para a moldagem dos corpos de prova como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Tempos de mistura a) 3 min b) 5 min c) 7 min



Fonte: o próprio autor

Na Figura 3.3 pode-se observar que nos 3 minutos de mistura não há homogeneidade tendo mais umidade em alguns lugares do que em outros. Já com 5 e 7 minutos apresenta homogeneidade e consistência adequada para facilitar a moldagem dos corpos de prova.

Finalmente, esse tempo foi comparado com o tempo utilizado pela empresa PROMSA, em Barcelona, que trabalha com 5 minutos de mistura para este tipo de concreto.

3.1.2.2.2 Adensamento

Para o concreto poroso, não existe uma metodologia padronizada para fazer o adensamento dos corpos de prova utilizados na medição das propriedades mecânicas e hidráulicas do material. Assim nesta pesquisa procurou-se um método que tivesse a menor influência do erro humano e pudesse ser repetido em futuras pesquisas.

Sendo assim, o adensamento dos corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para o ensaio de resistência à compressão foi feito na

mesa de consistência, como mostra a Figura 3.4, sendo fixado um número de 20 golpes por camada (duas camadas).

Figura 3.4 – Procedimento de adensamento dos corpos de prova de 100 mm por 200 mm



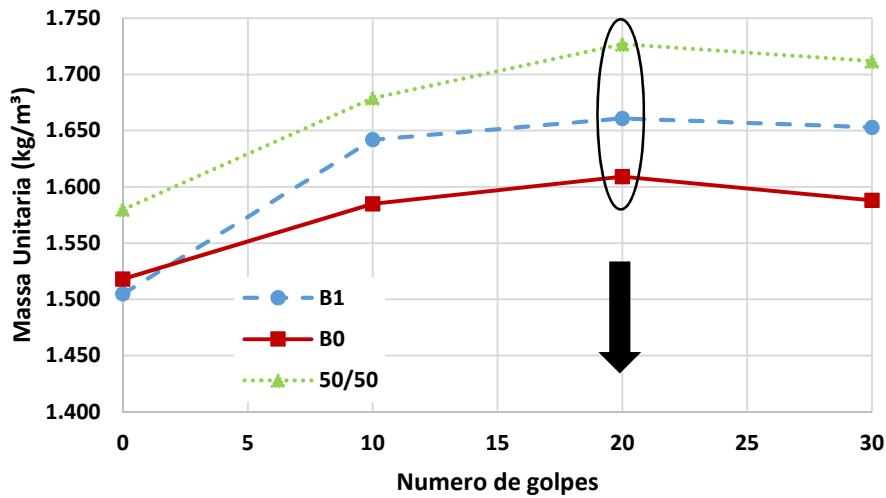
Fonte: o próprio autor

Para chegar no número de 20 golpes no processo de compactação foi feito o seguinte estudo: primeiro foi medida a massa unitária dos agregados soltos, e depois medida a massa unitária compactada com 10, 20 e 30 golpes por camada em duas camadas.

Tal procedimento de compactação foi escolhido por garantir uma altura, força e tempo constante de compactação diminuindo a influência do erro humano.

Finalmente foi avaliada a maior massa unitária de acordo ao número de golpes proporcionado para cada granulometria como mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Estudo do procedimento de compactação

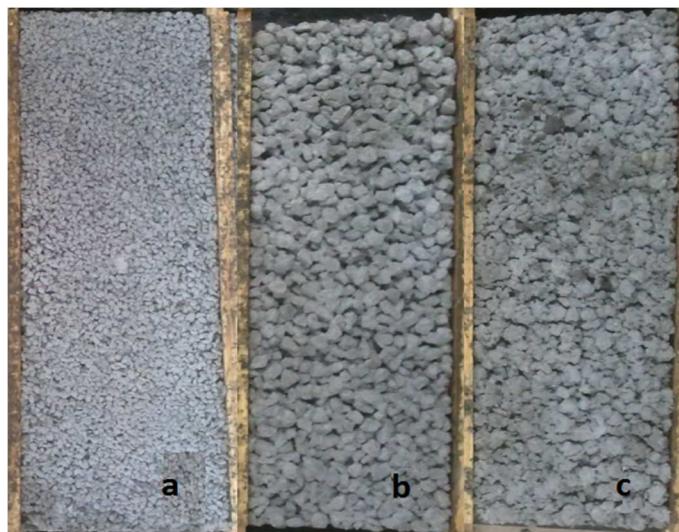


Fonte: o próprio autor

Como pode ser observado na Figura 3.5, com 20 golpes se obteve a maior massa unitária independente do diâmetro máximo do agregado e da distribuição granulométrica. Por tanto decidiu-se trabalhar com 20 golpes em duas camadas.

O adensamento para as placas do ensaio de flexo tração foi feito mediante 5 golpes de martelo de borracha ao redor da forma até obter uma superfície uniforme, as placas moldadas tinham as seguintes medidas 700 x 250 x 50 mm, concretadas em duas camadas de 25 mm de espessura como mostrado na Figura 3.6.

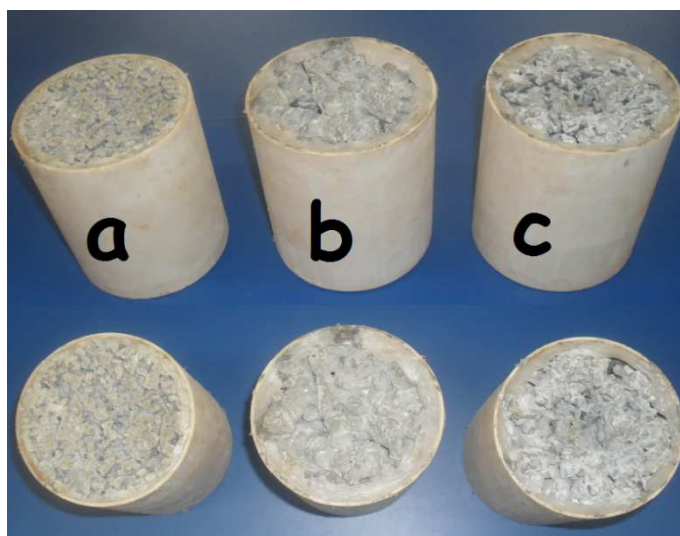
Figura 3.6 – Placas de concreto: a) B0; b) B1; c) 50/50



Fonte: o próprio autor

Para o ensaio de permeabilidade, os corpos de prova foram adensados com o mesmo procedimento dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão e foram moldados dentro de tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e 120 mm de altura, Figura 3.7. Os corpos de prova foram vedados com silicone para garantir que a água percolasse somente pela estrutura do concreto poroso e não na interface tubo-material.

Figura 3.7 – Corpos de Prova ensaio de permeabilidade a) B0 b) B1 c) 50/50



Fonte: o próprio autor

3.1.2.2.3 Cura

A cura dos corpos de prova e das placas foi realizada com imersão em água com cal até a idade do ensaio.

3.1.2.3 Planejamento Experimental

Para alcançar os objetivos propostos na primeira campanha experimental foi realizado um planejamento que pudesse levar em consideração os ensaios mecânicos e o ensaio de permeabilidade para as três granulometrias estudadas.

De acordo com o planejamento experimental, dado na Tabela 3.4, para avaliar o comportamento mecânico e hidráulico do concreto poroso, foram realizados três tipos de ensaios.

Tabela 3.4 – Planejamento experimental

Tipo de Ensaio	Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão Corpo de Prova (mm)	Amostras por idade		
				7 dias	14 dias	28 dias
Mecânicos	Resistência à compressão (NBR 5739/1994)	Cilíndrico	100 X 200	7	-	7
	Resistência à tração na flexão (NBR 15805/2010)	Placa	750 X 250 X 50	-	-	4
Hidráulicos	Permeabilidade (NBR 14545/2000)	Cilíndrico	100 X 120	-	3	-

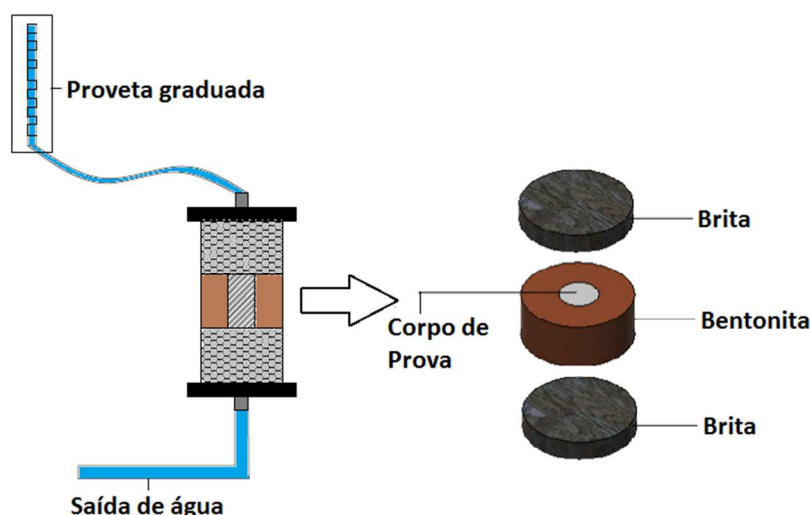
Fonte: o próprio autor

Como mostrado na Tabela 3.4 foram feitos um total de 42 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, 12 placas para o ensaio de flexo-tração, e 3 corpos de prova para o ensaio de permeabilidade.

Os ensaios mecânicos mostrados na Tabela 3.4 foram feitos baseados na normativa técnica vigente, e o ensaio de permeabilidade foi feito mediante a adaptação do ensaio de permeabilidade para solos finos no intuito de ter um valor aproximado desta propriedade no material.

A adaptação do ensaio de permeabilidade para solos finos segundo a norma NBR 14545/2000 é mostrada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Adaptação ensaio de permeabilidade para solos finos NBR 14545



Fonte: o próprio autor

Neste tipo de permeômetro visualizado na Figura 3.8, denominado de carga variável, são medidos o tempo e o volume de água que passa pelo corpo de prova, depois que este estava saturado. Para garantir isto, no ensaio se leva a cabo

um processo de saturação de pelo menos 5 dias, para conseguir saturar a bentonita e garantir que se está medindo a água que passa realmente pelo corpo de prova. O volume é medido através de uma proveta graduada e o tempo por um cronômetro. Por fim, também é medida a temperatura da água, no instante do ensaio, para se fazer a correção com relação à temperatura de 20 °C, padronizada para o ensaio.

Como mencionado anteriormente, o corpo de prova foi moldado em um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e 120 mm de altura. A parte externa do tubo foi lixada até obter uma superfície rugosa e garantir a aderência da bentonita. A montagem do ensaio pode ser visualizada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Montagem do ensaio de permeabilidade



Fonte: o próprio autor

Finalmente, o coeficiente de permeabilidade é calculado mediante a Equação 3.1 .

Equação 3.1 – Cálculo do coeficiente de permeabilidade k a carga variável

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln \frac{h1}{h2}$$

Em que:

k= Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

a= Área interna do tubo de carga (cm²)

H= Altura do corpo de prova (cm)

A= Área do corpo de prova (cm²)

Δt= Diferença de tempo entre a altura h1 e h2 (s)

h1= Altura inicial da coluna de água (cm)

h2= Altura final da coluna de água (cm)

3.2 Segunda campanha experimental

O objetivo desta campanha foi viabilizar a utilização de agregados graúdos sustentáveis na produção de concreto poroso, visando o reaproveitamento de diferentes tipos de resíduos com o intuito de tornar o concreto poroso ainda mais sustentável.

Para tanto, os resíduos escolhidos foram: escória siderúrgica, resíduos de construção civil (RCC), sendo neste caso predominantemente material cerâmico, e RCC de bloco de concreto.

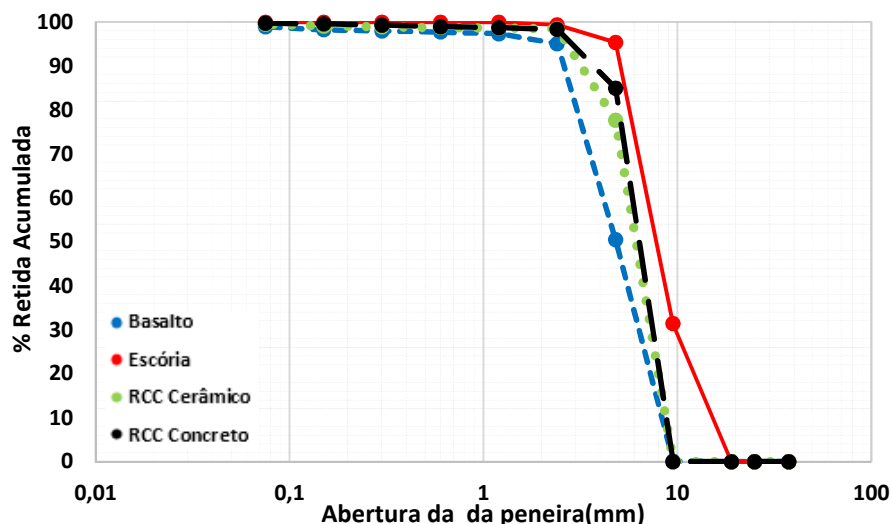
Os materiais utilizados nesta segunda campanha foram:

- Cimento Portland- CP II (F-32) composto com adição de filer calcário na proporção de 6 a 10%;
- Agregado graúdo de basalto de dimensão máxima 9,5 mm (brita zero – B0);
- Agregado graúdo de escória de dimensão máxima de 9,5 mm;
- Agregado graúdo de RCC Cerâmico de dimensão máxima de 9,5 mm;
- Agregado graúdo de RCC Concreto de dimensão máxima de 9,5 mm;
- Água potável.

3.2.1 Caracterização dos agregados graúdos sustentáveis

Os resultados da caracterização dos agregados graúdos sustentáveis se encontram nas Tabela 3.5 e 3.6. Na Figura 3.10 podem ser analisadas as curvas granulométricas do Basalto, a escória, o RCC cerâmico e o RCC de concreto, com base a norma NBR NM 248/2003. Nesta curva, destaca-se que aparentemente a escória tem uma granulometria diferente quando comparada com os outros 3 materiais mas o seu diâmetro máximo foi de 9.5 mm e tem as características de uma brita zero por isso foi escolhida para trabalhar.

Figura 3.10 – Curvas granulométricas Basalto, Escória, RCC cerâmico e RCC Concreto.



Fonte: o próprio autor

Como se pode observar na Figura 3.10 o agregado de basalto possui uma granulometria descontínua, com Cu de 2,2. Já a escória apresenta um Cu de 1,8 indicando ser mais uniforme do que o basalto, tendo uma granulometria uniforme já que o 80 % dos grãos tem um único tamanho. O RCC cerâmico apresenta um Cu 2,16 melhorando a distribuição dos grãos na curva granulométrica e o RCC de bloco de concreto possui uma distribuição descontínua e um Cu de 1.86. Quando analisadas as granulometrias pelo Cu todas são uniformes.

Os resultados dos demais ensaios de caracterização realizados para os agregados graúdos se encontram na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados ensaios de caracterização dos agregados graúdos

Tipo de Agregado	NBR NM 53/2003 Massa Específica (g/cm ³)	NBR 7251/1982 Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 46/2003 Teor de Material pulverulento (%)	NBR NM 53/2003 Absorção de água (%)
Basalto	2,80	1,50	4,15	1,42
Escória	2,70	1,60	0,00	0,49
RCC Cerâmico	1,80	1,12	5,50	10,16
RCC Concreto	2,12	1,30	4,50	6,12

Fonte: o próprio autor

Tabela 3.6 – Análise granulométrica dos agregados graúdos sustentáveis

Tipo de Agregado	Basalto		Escória		RCC Cerâmico		RCC Concreto	
	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
37,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,5	0,17	0,17	31,45	31,45	0,00	0,00	0,00	0,00
4,8	50,35	50,51	63,95	95,39	77,66	77,66	84,99	84,99
2,4	44,59	95,11	3,97	99,37	20,85	98,51	13,39	98,38
1,2	2,27	97,37	0,59	99,96	0,18	98,69	0,37	98,74
0,6	0,40	97,77	0,00	99,96	0,09	98,78	0,23	98,97
0,3	0,23	98,00	0,00	99,96	0,20	98,98	0,34	99,31
0,15	0,25	98,25	0,01	99,97	0,12	99,09	0,32	99,63
FUNDO	1,03	100,00	0,00	99,97	0,46	100,00	0,24	100,00
D60	5,50		18,00		6,70		6,90	
D10	2,50		10,00		3,10		3,70	
Cu	2,20		1,80		2,16		1,86	
Dimensão máxima característica (mm)	9,5		9,5		9,5		9,5	
Módulo de Finura	6,36		6,99		6,71		6,8	

Fonte: o próprio autor

Da Tabela 3.5 se pode concluir que dependendo da natureza do agregado propriedades como a massa específica a massa unitária são muito variáveis. Da mesma forma, o teor de material pulverulento tem a ver com a composição granulométrica do material e finalmente a absorção variou muito e foi maior nos resíduos de construção civil pela natureza dos mesmos.

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Dosagem

Para a segunda campanha experimental foi utilizado o mesmo traço utilizado na primeira campanha experimental. Neste caso teve que ser feita a correção da água de amassamento, como mostrado na Tabela 3.7, em virtude da elevada absorção dos agregados sustentáveis.

Tabela 3.7 – Consumo de materiais por m³ de concreto

Tipo de agregado	Consumo cimento (kg)	Consumo de agregado (kg)	a/c	Água (l)	Absorção do agregado (%)	Água de absorção (l)	Correção da água de amassamento (l)
Basalto	420	1369,2	0,34	142,8	1,20	16,43	159,23
Escória	420	1369,2	0,34	142,8	0,49	6,71	149,51
RCC cerâmico	420	1369,2	0,34	142,8	10,16	139,11	281,91
RCC Concreto	420	1369,2	0,34	142,8	6,12	83,80	226,60

Fonte: o próprio autor

3.2.2.2 Produção do concreto

A mistura se procedeu com a mesma sequência da primeira campanha experimental. O adensamento dos corpos de prova de resistência à compressão e das placas de resistência à flexo-tração foi realizado da mesma forma que na primeira campanha experimental. A cura dos corpos de prova e das placas foi feita imersa em água com cal até a idade do ensaio.

3.2.2.3 Planejamento experimental

De acordo com o planejamento experimental, para avaliar o comportamento mecânico e hidráulico do concreto poroso, foram feitos seis tipos de ensaios, como podem ser visualizados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Planejamento experimental segunda campanha

Tipo de ensaio	Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão Corpo de Prova (mm)	Amostras por idade		
				7 dias	14 dias	28 dias
Ensaio Mecânicos	Resistência à compressão (NBR 5739/2007)	Cilíndrico	100 X 200	7	7	7
	Resistência à tração na flexão (NBR 15805/2010)	Placa	750 X 250 X 50	-	-	4
Ensaio Hidráulicos	Permeabilidade carga variável (NBR 14545/2000)	Cilíndrico	100 X 120	-	3	-
	Permeabilidade carga constante	Cilíndrico	100 X 200	-	-	5
	Vazios (%)	Cilíndrico	100 X 200	-	-	5
Desgaste	Cántabro (NLT-352-00)	Cilíndrico	100x150			3

Fonte: o próprio autor

Nesta campanha experimental, foram introduzidos o ensaio de permeabilidade, a carga constante e a medição da porcentagem de vazios em estado endurecido e o ensaio de cantabro para medição do desgaste. O ensaio de permeabilidade a carga constante e a medição da porosidade utilizaram os mesmos corpos de prova do ensaio de resistência à compressão já que a medição da porosidade não ia afetar o resultado final da compressão.

O ensaio de permeabilidade a carga constante é uma proposta de trabalho do estudante de doutorado da Universidade Politécnica de Catalunha Ricardo Piellarisi e finalmente o ensaio de desgaste cantabro para avaliar a perda por desgaste.

3.2.3 Ensaio em estado fresco

Em estado fresco foram medidas as seguintes propriedades: consistência (Slump test) e massa específica. A consistência foi medida pela norma ABNT NM 67:1998, simplesmente para fazer uma verificação já que no concreto poroso não vai ser uma propriedade fundamental.

O ensaio de massa específica em estado fresco foi realizado também para todos os materiais para verificar a variação com relação ao tipo de agregado utilizado seguindo a norma NBR 9833:2008, como mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.11 – Ensaio de massa específica



Fonte: o próprio autor

A massa específica variou dependendo do tipo de agregado e a composição granulométrica do mesmo, esta última leva a formação de uma maior ou menor quantidade de vazios em cada mistura.

Uma das propriedades principais do concreto poroso é a porcentagem de vazios interna, já que está interligada com a permeabilidade e com as resistências mecânicas do material. Assim saber o valor da mesma é de vital importância para compreender o comportamento do material.

3.2.4 Medição dos vazios (%)

A medição dos vazios em estado endurecido foi realizada nos mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão. Para este ensaio, os corpos de prova estavam em estado saturado superfície seca para garantir a não absorção da água. Os corpos de prova foram envoltos com filme de PVC esticável, pela superfície lateral e pela face inferior. Em seguida, foram introduzidos no molde metálico cilíndrico, com as mesmas medidas, para garantir

que o filme de PVC não sofresse deformações. Posteriormente, o molde com o corpo de prova foi pesado em uma balança e tarado. Por último, se adicionou água até preencher os vazios internos do material e quando a água aflorava na superfície se tomou a medida do seu peso.

Este ensaio foi utilizado por não contar com nenhuma norma para medição desta propriedade no concreto poroso e pela recomendação de pesquisas, como as realizadas por Neithalath *et al.* (2010), Deo & Neithalath, (2011), Sumanasooriya & Neithalath, (2011), Neithalath *et al.* (2006).

Na Figura 3.13 se apresenta a sequência de montagem do ensaio de medição dos vazios em estado endurecido.

Figura 3.12 – Montagem ensaio de medição dos vazios



Fonte: o próprio autor

Finalmente os vazios (%) são calculados mediante a Equação 6.

Equação 3.2 – Cálculo da porcentagem de vazios em estado endurecido

$$V = \frac{V_{\text{água}} * 100}{V_{cp}}$$

Em que:

V= Vazios (%)

V_{água} = Volume de água adicionada até aflorar na superfície do corpo de prova (l)

V_{cp} = Volume do corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (l)

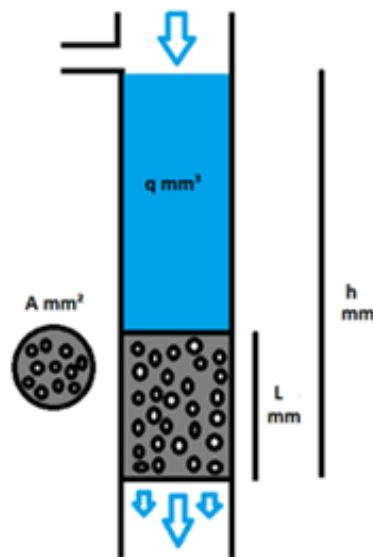
Depois da medição de vazios em estado endurecido pode ser realizado o ensaio de permeabilidade com o intuito de avaliar a capacidade drenante do material e a correlação que tem estas duas propriedades.

3.2.4 Ensaio de permeabilidade

A permeabilidade foi medida pela adaptação do ensaio para solos finos segundo a norma NBR 14545 (carga variável) e pelo ensaio de carga constante que se descreve a seguir.

O ensaio de carga constante segue o princípio da Lei de Darcy e basicamente mede a quantidade de água que passa pelo corpo de prova em um tempo determinado como pode ser observado na Figura 3.14.

Figura 3.13 – Ensaio de permeabilidade de carga constante



Fonte: o próprio autor

Para o ensaio de carga constante foram utilizados os mesmos corpos de prova da resistência à compressão; estes estavam em estado saturado superfície seca. Os corpos de prova foram envolvidos com filme de PVC esticável pela lateral e feito um recobrimento com fita adesiva convencional, posteriormente com fita silver tape (fita com filme de Polietileno reforçado com tecido laminado de algodão), utilizada para garantir a impermeabilidade. Na sequência, o corpo de prova

foi posicionado entre dois tubos de PVC com o mesmo diâmetro; o tubo da parte superior continha um extravasor para garantir o nível da água. A montagem do ensaio pode ser visualizada na Figura 3.15.

Figura 3.14 – Montagem ensaio de permeabilidade de carga constante



Fonte: o próprio autor

O ensaio começa logo que é saturado totalmente o sistema, e o nível da água chega na altura do tubo extravasor, depois pode começar a ser coletado um volume de água e se vá tomando o tempo, no caso de este ensaio se trabalho com 15, 30, 45, 60 segundo de tempo e o volume coletado para cada tempo.

Finalmente, o cálculo do coeficiente de permeabilidade com este ensaio se faz como mostrado na Equação 3.3.

Equação 3.3 – Cálculo da permeabilidade k a carga constante

$$k = \frac{q * L}{A * h * t}$$

Em que:

k: Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)

q: Volume de água que passa pelo corpo de prova (cm³)

A: área do corpo de prova (cm²)

h: Altura da lamina de água (cm)

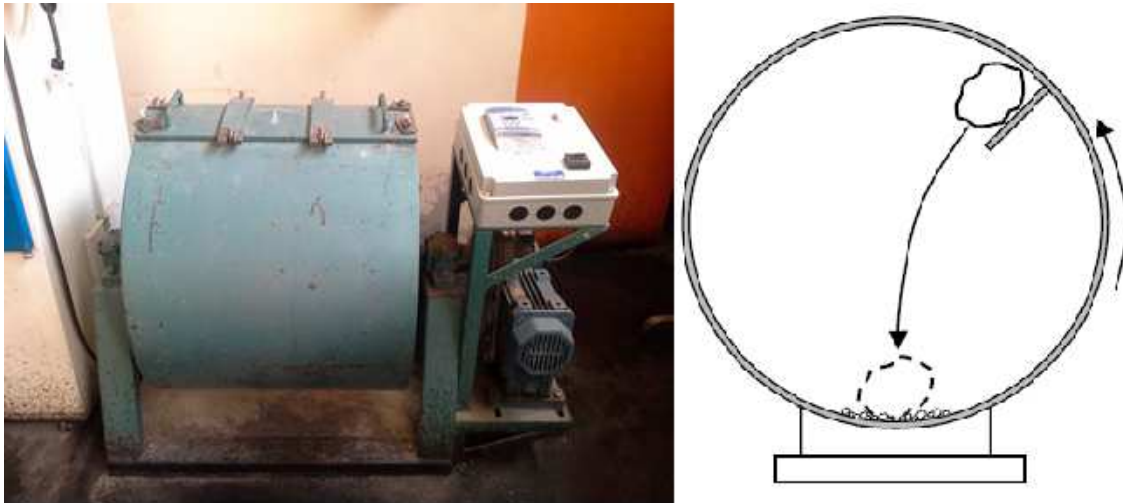
t: Tempo para coletar o volume de água (s)

3.2.5 Desgaste (%)

Como a aplicabilidade deste tipo de material será no uso de placas drenantes para calçadas é importante ter uma avaliação do desgaste que pode ocorrer no material por causa do uso, e mais importante ainda por causa do tipo de agregado utilizado, logo foi realizado o ensaio de cantabro para medir a perda de massa por desgaste no material segundo a norma NTL-362/92.

O equipamento e o esquema do ensaio pode ser observado na Figura 3.16.

Figura 3.15 – Ensaio de desgaste (Cantabro)



Fonte: o próprio autor

A sequência do ensaio é a que se segue:

- Preparar corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura
- O ensaio é feito aos 28 dias de cura
- Se pesa o corpo de prova seco antes do ensaio
- Se posiciona o corpo de prova na máquina de los angeles sem carga abrasiva.
- Se programa a máquina para dar um número total de 300 voltas
- Se inicia o ensaio com uma velocidade constante
- Finalmente se pesa novamente o corpo de prova depois do ensaio.

O desgaste do material se calcula mediante a Equação 3.4.

Equação 3.4 – Cálculo da perda por desgaste do material

$$P = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Em que:

P= Perda por desgaste (%)

P1= Massa inicial do corpo de prova (g)

P2= Massa final do corpo de prova (g)

3.3 Resumo das campanhas experimentais

Destaca-se que, nas duas campanhas experimentais foram produzidos aproximadamente 0,5 m³ de concreto, sendo em sua maioria corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, o restante foram placas para os ensaios de flexo-tração e finalmente permeabilidade e desgaste como mostrado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resumo Campanhas experimentais

Tipo de ensaio	Ensaio	Número de CPs por Campanha		Total	Volume total m ³
		1	2		
Ensaio Mecânicos	Resistência à compressão (NBR 5739/2007)	42	84	126	0,198
	Resistência à flexo-tração (NBR 15805/2010)	12	16	28	0,263
Ensaio Hidráulicos	Permeabilidade carga variável (NBR 14545)	3	4	7	0,007
Desgaste	Cântabro (NLT-352-00)	0	12	12	0,014
				Total	0,481

Fonte: o próprio autor

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo se apresentam os resultados e análise provenientes das campanhas experimentais desenvolvidas ao longo deste trabalho. Em um primeiro momento, se mostram os resultados da primeira campanha, na qual o objeto de estudo foi a influência da granulometria no desempenho do concreto poroso. A continuação os resultados da segunda campanha são apresentados sendo o objetivo a verificação do desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis.

4.1 Primeira campanha experimental

Na primeira campanha experimental foram utilizadas duas dimensões máximas de brita. Sendo assim, foram utilizadas brita zero, brita um e 50 % de brita zero e 50 % de brita um para fazer a composição granulométrica.

Para as propriedades mecânicas e hidráulicas foram analisados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação presente na medição de cada uma delas.

4.1.1 Influência dos finos no desempenho do concreto poroso

Para fazer um análise da influência dos materiais finos no comportamento mecânico do material foi considerado agregado miúdo (areia) tudo o que passa pela peneira 4,8 até a 0,15, e foram considerados finos tudo o que passa pela 0,15 até o fundo.

Portanto essa areia e esses finos vão ajudar na formação de pasta e argamassa que fará a ponte de aderência entre grão e grão dependendo a composição granulométrica de cada mistura.

Observa-se na Tabela 4.1, que a B0 tem o maior porcentagem de argamassa igual a 61,34% quando comparado à porcentagens das outras duas granulometrias. Sendo assim a argamassa formada pela B0 vai formar a ponte de união entre os grãos, esta argamassa é mais fraca quando comparada à formada na 50/50 pelo alto teor de areia e finos na sua composição.

Tabela 4.1 – Porcentagens de material para cada uma das granulometrias

Material	% cimento	% gráudo	% areia	% finos	Pasta (%)	Argamassa (%)
B0	23,47	38,66	36,53	1,34	24,81	61,34
B1	23,47	76,29	0,09	0,15	23,62	0
50/50	23,47	58,37	17,59	0,57	24,04	41,63

Fonte: o próprio autor

4.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi avaliada aos 7 e 28 dias e os resultados estão apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.1.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	B0		B1		50/50	
	7	28	7	28	7	28
Idade (dias)						
Resistência à Compressão (MPa)	7,50	10,50	5,30	13,20	13,00	18,60
	7,10	10,00	5,80	6,84	13,00	19,90
	7,60	9,20	3,50	12,90	13,50	19,10
	7,90	9,30	6,40	12,40	11,00	18,50
	7,20	9,20	9,00	8,40	13,70	19,90
	7,40	9,20	6,80	5,00	11,70	19,40
	8,00	9,00	7,80	11,00	13,30	18,90
Média (MPa)	7,53	9,49	6,37	9,96	12,74	19,19
Desvio Padrão	0,34	0,55	1,77	3,24	1,00	0,57
Coefficiente de Variação (%)	4,45	5,79	27,82	32,51	7,88	2,99

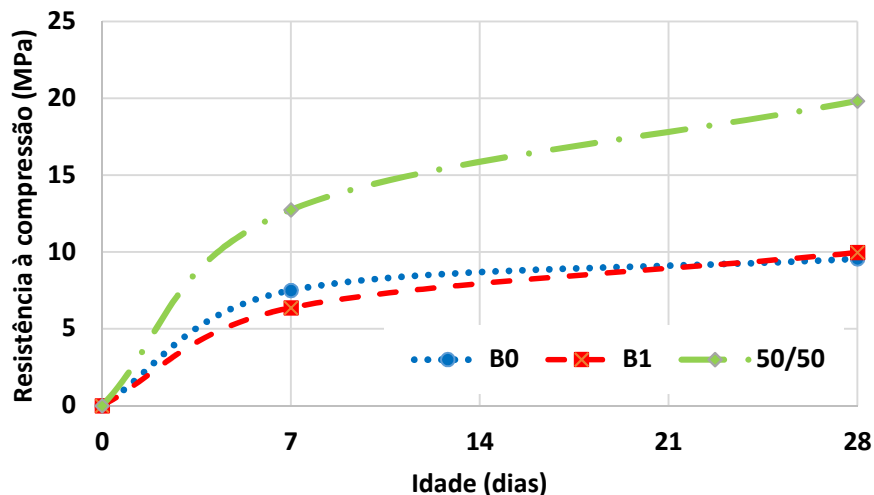
Fonte: o próprio autor

Na Tabela 4.2 observa-se que o concreto com B0 apresentou o menor coeficiente de variação, o que indica uma maior homogeneidade entre os corpos de prova analisados. Outro fator que contribuiu positivamente na diminuição do coeficiente de variação foi o fato de ter grãos de menor tamanho, resultando em mais pontos de contato quando comparada com a B1.

O maior coeficiente de variação foi o da B1, que se explica pelo acabamento final dos corpos de prova, quer dizer a superfície ficou muito rugosa o que dificultou a aplicação do ensaio. Assim tal acabamento rugoso é explicado pela falta de formação de argamassa neste tipo de mistura, já que como mostrado na Tabela 4.2 é claro que a B1 é a única que só tem formação de pasta. As outras duas

misturas que tiveram formação de argamassa tiveram menores coeficientes de variação quando comparados com a B1.

Figura 4.1 – Evolução da resistência à compressão



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.1 pode ser observado que nas três misturas trabalhadas a evolução da resistência aos 7 e aos 28 dias foi dada pelo tipo de cimentos nas três misturas trabalhadas.

Também é verificado que o Cu está relacionado diretamente com a resistência do material, no caso da 50/50 com Cu de 3,44 a resistência a compressão foi de 19,19MPa, a maior quando comparadas com as outras duas granulometrias. Este fato é corroborado na pesquisa de Neptune & Putman (2010), aonde eles concluem que quanto maior for o coeficiente de uniformidade maior vai ser a resistência à compressão.

Portanto na melhora granulométrica apresentada na composição 50/50 se aumenta continuidade da granulometria, a densidade e o empacotamento dos grãos. Assim, maiores pontos de contato e menores vazios vão garantir uma melhor distribuição de esforços ante a aplicação de carga, e como consequência um aumento na resistência à compressão.

A B1 não tem formação de argamassa e só tem um porcentagem de pasta de 23,62%. Assim, os ganhos na resistencia a compressão são levados a cabo pelo tamanho do agregado e pela pasta que faz a ponte de união entre os grãos.

4.1.3 Resistência à flexo-tração

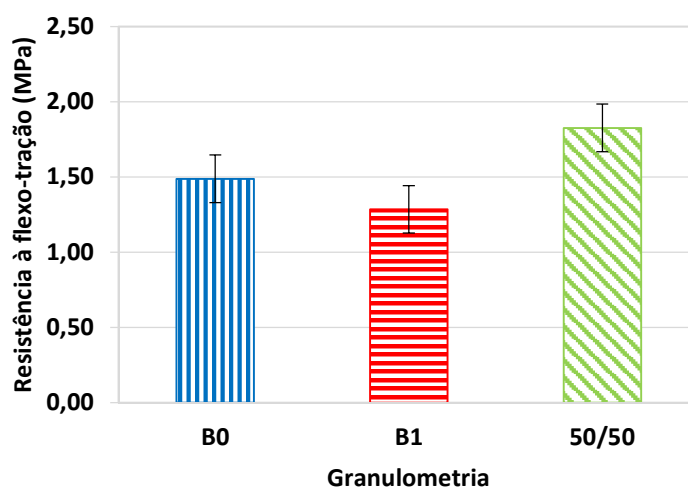
Na Tabela 4.3 e Figura 4.2 se apresentam os resultados obtidos na avaliação da resistência à flexo-tração nas três misturas estudadas.

Tabela 4.3 – Resistência à flexo-tração da primeira campanha experimental

Tipo de Agregado	B0	B1	50/50
Idade (dias)	28	28	28
Resistência à flexo-tração (MPa)	1,35	1,35	1,62
	1,35	1,35	1,62
	1,62	1,35	1,89
	1,62	1,08	2,16
Média (MPa)	1,49	1,28	1,83
Desvio Padrão	0,16	0,14	0,26
Coefficiente de Variação (%)	10,50	10,53	14,18

Fonte: o próprio autor

Figura 4.2 – Comparação da resistência à flexo-tração



Fonte: o próprio autor

No caso da resistência a flexo-tração o travamento dos grãos é um parâmetro importante, quer dizer granulometrias uniformes, com só um tamanho de grãos não vão gerar tal travamento e vão ser mais frágeis nos contatos entre grão e grão como mostrado na Figura 4.2.

A B1 não vai garantir um travamento real entre os grãos mais sim um contato pontual entre eles levado a cabo pelo 23% de pasta formada, esse

contato entre os grãos torna-se mais frágil pelo tamanho máximo de 19 mm, por tanto a B1 atinge a menor resistencia na flexo-tração quando comparado com as outras duas granulometrias como mostrado na Figura 4.2.

Finalmente no caso da combinação 50/50 a melhora granulométrica confirma que existe um travamento real quer dizer os vazios dos grãos de maior tamanho são preenchidos pelos grãos de menor tamanho. As pontes de aderência entre grão e grão são feitas pela argamassa por tanto atinge a maior resistencia quando comparado com as outras duas granulometrias utilizadas como mostrado na Figura 4.2.

4.1.4 Porcentagem de Vazios (%)

Nesta campanha os vazios foram calculados utilizando a relação entre massa específica e massa unitária para cada uma das misturas trabalhadas mediante a Equação 4.1. Na Tabela 4.3, se apresentam os resultados do cálculo teórico da porcentagem de vazios.

Equação 4.1 – Cálculo teórico da porcentagem de vazios

$$V(\%) = \frac{ME - MU}{ME} * 100$$

Em que:

V= Porcentagem de vazios (%)

ME= Massa específica teórica (kg/m³)

MU= Massa Unitária (kg/m³)

Tabela 4.4 – Porcentagem de Vazios (%) primeira campanha experimental

Tipo de agregado	Porcentagem de Vazios (%)
B0	36,44
B1	32,26
50/50	31,47

Fonte: o próprio autor

Como era de se esperar, a combinação das britas (50/50) teve uma redução na sua porcentagem de vazios explicada pela sua composição

granulométrica mais contínua e pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação.

4.1.5 Permeabilidade

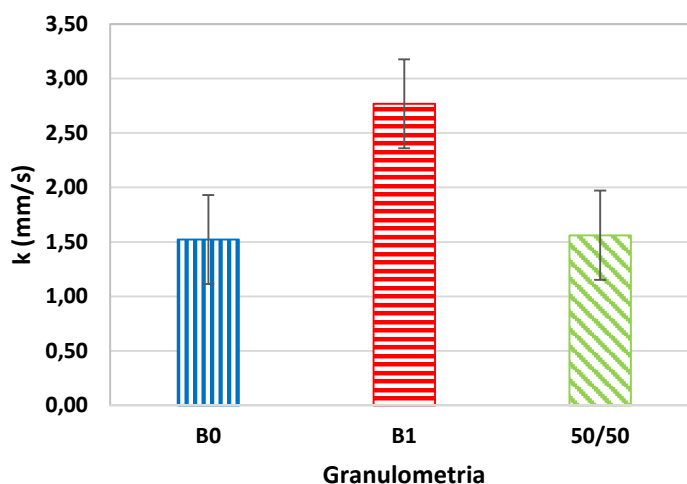
Na Tabela 4.4 e na Figura 4.3, encontram-se os resultados do coeficiente de permeabilidade avaliado mediante a adaptação do ensaio de permeabilidade para solos finos.

Tabela 4.5 – Coeficiente de permeabilidade k das misturas de concreto poroso

Granulometria	k (mm/s)	ACI 522R-06
B0	1,52	Cumpre
B1	2,77	Cumpre
50/50	1,56	Cumpre

Fonte: o próprio autor

Figura 4.3 – Comparação coeficientes de permeabilidade k



Fonte: o próprio autor

Segundo os resultados da Tabela 4.3 os coeficientes de permeabilidade cumprem o com valor mínimo estipulado pela norma ACI 522R-06 a qual fixa a permeabilidade mínima para concreto poroso em 1.35 mm/s.

Da Figura 4.3 se conclui que a B1 obteve o maior coeficiente de permeabilidade quando comparado com as outras duas granulometrias. Este fato se explica pela sua granulometria uniforme, seu tamanho máximo de 19 mm e seu C_u de 1.56. Assim os vazios internos teriam um maior diâmetro e como consequência

uma maior permeabilidade. Concordando com Neptune & Putman (2010) que concluem que quanto menor o coeficiente de uniformidade maior será o coeficiente de permeabilidade do material.

O ensaio de permeabilidade adaptado permite medir o coeficiente de permeabilidade k , mas não concorda com a porcentagem de vazios. Logo, este deve ser comparado com um outro ensaio para verificar sua efetividade.

4.1.6 Resumo Primeira Campanha Experimental

Finalmente a granulometria que apresentou o melhor desempenho mecânico foi a 50/50 como mostrado na Tabela 4.6, porém, foi a escolhida foi a B0 com $D_{máx}$ 9,5 mm pelo acabamento mais uniforme visando ser utilizada em placas.

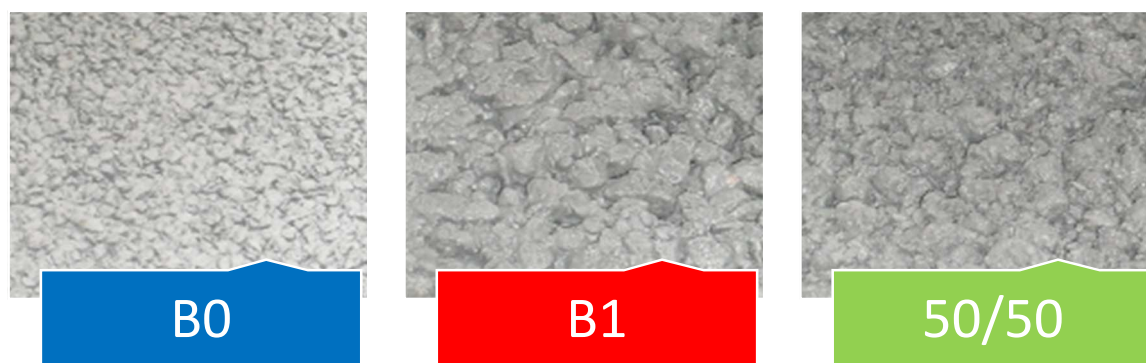
Tabela 4.6 - Resumo Primeira Campanha Experimental

Granulometria	Resistência à Compressão	Resistência à Flexo-tração	Permeabilidade	Acabamento
B0				
B1				
50/50				

Fonte: o próprio autor

O acabamento da B0 é uma acabamento uniforme que vão garantir a segurança e o conforto do usuário, já na B1 e na 50/50 por ter tamanhos máximos de 19 mm, o acabamento final vai ser rugoso apresentando um risco para os pedestres e os usuários finais do material, como mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Acabamento Placas Primeira Campanha Experimental



Fonte: o próprio autor

4.2 Segunda campanha experimental

Na segunda campanha experimental o objetivo foi avaliar o desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis. Inicialmente foi realizada uma verificação das propriedades em estado fresco do material como são a consistência e a massa específica.

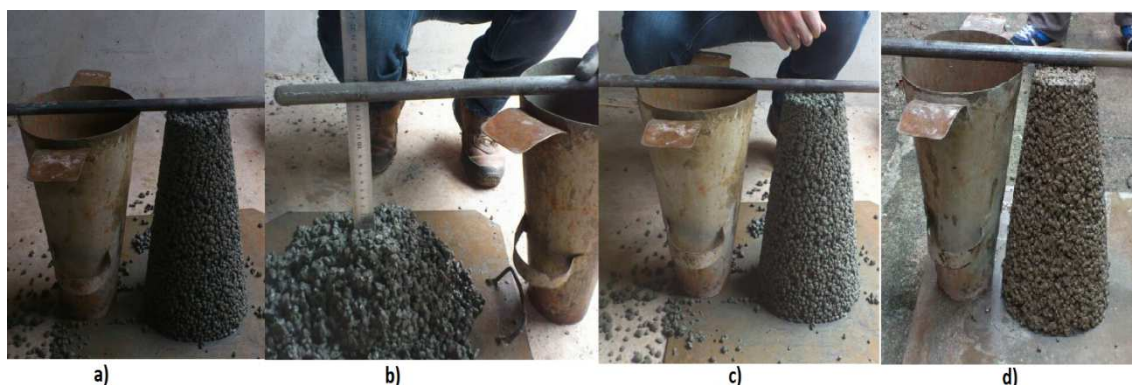
Já no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão e flexo-tração para verificação das propriedades mecânicas. Para a avaliação das propriedades hidráulicas foram implementados a medição de vazios em estado endurecido e a permeabilidade a carga constante. Finalmente a durabilidade foi medida pelo ensaio de cantabro que mede a perda ao desgaste do material.

4.2.1 Propriedades em estado Fresco

4.2.1.1 Consistência

A medida da consistência foi realizada pelo Slump test segundo a norma ABNT NM 67:1998, no concreto poroso não vai ser uma medida determinante já que a maioria das vezes vai dar zero por ser uma mistura com uma relação água-cimento tão baixa. Na Figura 4.5 pode ser observada a realização do ensaio.

Figura 4.5 – Ensaio de consistência segunda campanha experimental a) Basalto b) Escória C) RCC Cerâmico d) RCC Concreto



Fonte: o próprio autor

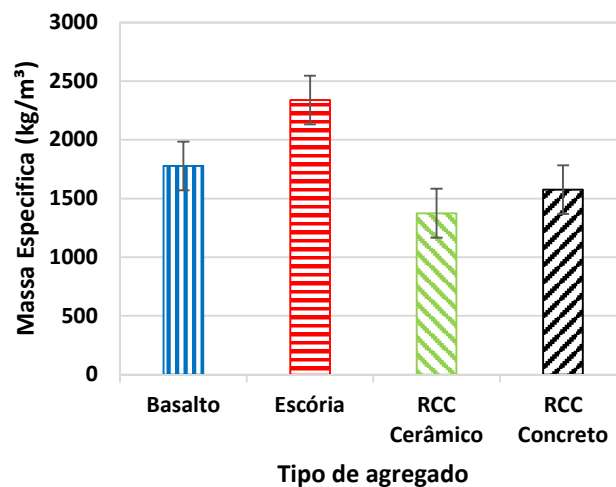
Na Figura 4.5, pode ser observado que a única mistura que apresentou abatimento (16 cm) foi a realizada com agregados de escória, já que este material não tem fino dentro da sua composição granulométrica. Logo não consegue

formar uma argamassa que fortaleça os enlaces entre grãos, dita mistura tem uma aparência mais fluida quando comparada com as outras três misturas trabalhadas.

4.2.1.2 Massa Especifica

A massa especifica foi medida no estado fresco e os resultados são mostrados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Variação da massa unitária dependendo o tipo de agregado



Fonte: o próprio autor

Como se pode analisar na Figura 4.6 o concreto com escória teve a massa especifica maior pela natureza do tipo de agregado seguida pelo basalto, o RCC de concreto e finalmente o RCC cerâmico. Tendo como massa específica mínima 1375 kg/m^3 e máxima 2340 kg/m^3 . Concordado com Mehta & Monteiro (1994) já que para eles o principal responsável pela massa especifica do material vai ser a massa unitária do agregado e sua composição granulométrica.

4.2.2 Influência dos finos no desempenho do concreto poroso

Para fazer um análise da influência dos materiais finos no comportamento mecânico do material foi considerado agregado miúdo (areia) tudo o que passa pela peneira 4,8 até a 0,15, e foram considerados finos tudo o que passa pela 0,15 até o fundo.

Os agregados sustentáveis utilizados na segunda campanha experimental tinham curvas granulométricas similares porem conteúdos de agregados miúdos e finos diferentes. Assim fazendo a análise respeito aos agregados miúdos e os finos tem-se que em alguns casos se formou argamassa e em outros pasta como mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Porcentagens de material para cada um dos materiais

Material	% cimento	% graúdo	% areia	% finos	Pasta (%)	Argamassa (%)
Basalto	23,47	38,66	36,53	1,34	24,81	61,34
Escória	23,47	76,03	0,46	0,03	23,51	0,03
RCC cerâmico	23,47	59,43	16,40	0,69	24,17	40,57
RCC concreto	23,47	65,04	11,21	0,28	23,76	34,96

Fonte: o próprio autor

Como mostrado na Tabela 4.7 o basalto teve uma mistura mais argamassada tendo um 63% de argamassa seguido pelo RCC cerâmico com 41% e pelo RCC de concreto com 35%. Já no caso da escória por não ter materiais finos tão teve formação de argamassa mas sim formação de pasta de 24%.

Na Figura 4.7 pode ser observada a pasta e a argamassa formada para cada um dos materiais.

Figura 4.7 – Vazios internos das misturas trabalhadas: a) Basalto b) Escória c) RCC Cerâmico d) RCC Concreto



(a)

(b)



(b)

(d)

Fonte: o próprio autor

Da análise da Figura 4.7a, observa-se que no basalto a argamassa formada teve uma distribuição homogênea e foi a mistura mais argamassada de todas. Assim muitos dos vazios formados foram preenchidos pela argamassa, diminuindo sua porcentagem de vazios.

No caso da escória, na Figura 4.7b, é notório que a ligação entre os grãos foi feita somente pela pasta. As características da dosagem fizeram que a pasta tivesse maior resistência que o agregado explicando porque sempre acabava rompendo o agregado e não a pasta.

Finalmente, no caso dos RCC cerâmico e de concreto a argamassa ficou muito bem distribuída, devido primeiro pela forma arredondada dos grãos somado a absorção dos mesmos, que contribui para dar uma maior ancoragem da argamassa permitindo a formação de estruturas muito mais porosas.

4.2.2 Resistência à compressão

Os concretos para esta propriedade foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias respectivamente. A Tabela 4.8 e a Figura 4.8, apresentam os valores da medição desta propriedade, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

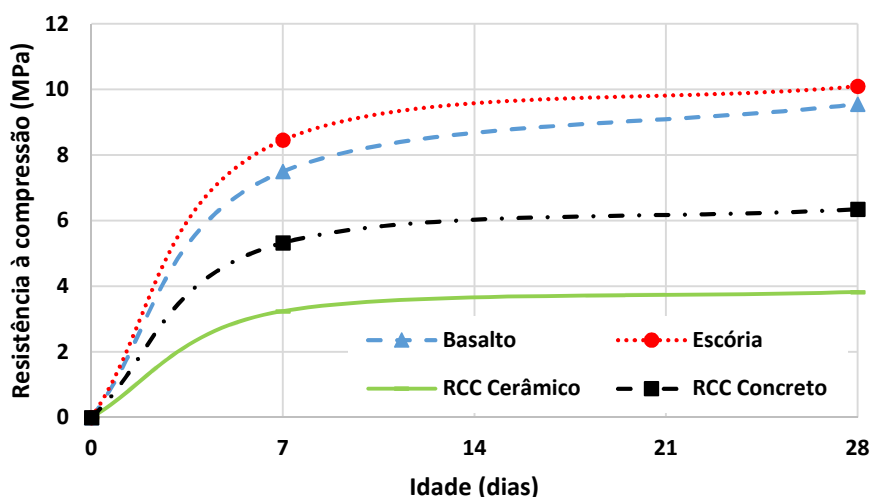
Tabela 4.8 – Resistência à compressão segunda campanha experimental

Tipo de Agregado	Basalto			Escória			RCC Cerâmico			RCC Concreto		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Resistência à Compressão (MPa)	7,50	8,30	10,50	8,80	10,10	10,00	3,10	3,30	3,50	5,20	5,70	6,10
	7,10	8,10	10,00	8,00	9,30	9,70	3,20	3,40	3,30	5,70	5,80	6,50
	7,60	8,00	9,20	8,90	9,70	11,00	3,00	3,10	4,00	5,10	5,60	6,10
	7,90	8,70	9,30	8,00	8,70	10,20	3,40	3,20	4,20	5,40	5,20	7,20
	7,20	8,50	9,20	8,50	9,50	9,80	3,50	3,60	4,10	5,30	5,50	6,10
	7,40	8,40	9,20	8,60	9,00	10,00	3,30	3,50	3,90	5,20	5,40	6,40
	7,80	8,60	9,50	8,40	9,40	10,00	3,20	3,30	3,80	5,40	5,70	6,10
Média (MPa)	7,50	8,37	9,56	8,46	9,39	10,10	3,24	3,34	3,83	5,33	5,56	6,36
Desvio Padrão	0,29	0,26	0,51	0,36	0,46	0,43	0,17	0,17	0,33	0,20	0,21	0,41
Coefficiente de Variação (%)	3,93	3,06	5,30	4,20	4,86	4,24	5,30	5,14	8,49	3,71	3,73	6,41

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 4.8, pode ser analisado que o RCC cerâmico apresentou os maiores coeficientes de variação quando comparado com os outros três agregados utilizados, isto pode ser explicado pela natureza e heterogeneidade do material.

Figura 4.8 – Evolução da resistência à compressão



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.8 pode ser observado que nas quatro misturas trabalhadas a evolução da resistência aos 7 e aos 28 dias foi dada pelo tipo de cimento utilizado.

Destaca-se que os resultados obtidos para esta propriedade foram influenciados mais pela natureza do agregado que pela granulometria do mesmo, aonde agregados como a escória tiveram a maior resistência a compressão e agregados como o RCC cerâmico tiveram a menor resposta mecânica explicada também pela sua natureza.

As areias e os finos próprios de cada granulometria não influenciaram a resistência a compressão aonde a maior influência esteve na natureza dos agregados como mostrado na Figura 4.8.

4.2.3 Resistência à flexo-tração

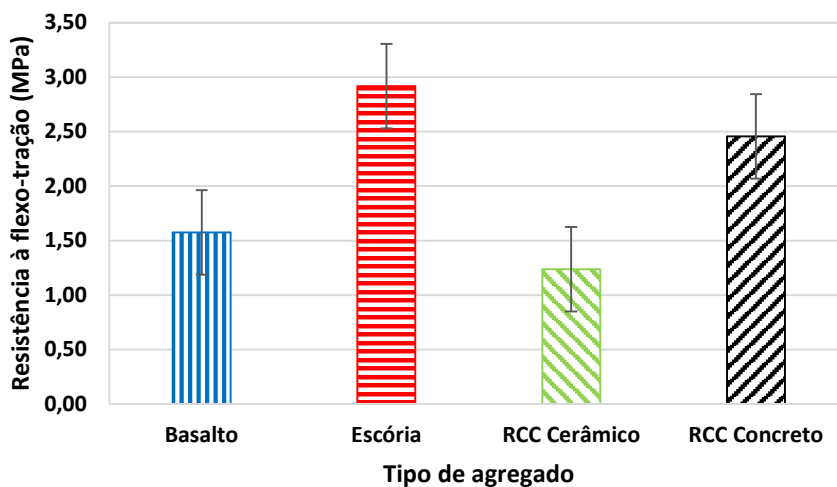
Este ensaio foi realizado com placas conforme descrito no capítulo 3, as placas foram ensaiadas aos 28 dias de cura. Na Tabela 4.9 e na Figura 4.9, mostram-se os valores da medição desta propriedade, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 4.9 – Resistência à flexo-tração das misturas de concreto poroso

Tipo de Agregado	Basalto	Escória	RCC Cerâmico	RCC Concreto
Idade (días)	28	28	28	28
Resistência à Flexo-Tração (MPa)	1,55	2,43	1,23	2,46
	1,50	3,25	1,26	2,43
	1,62	3,15	1,22	2,50
	1,62	2,84	1,24	2,43
Média (MPa)	1,57	2,92	1,24	2,46
Desvio Padrão	0,06	0,37	0,02	0,03
Coeficiente de Variação (%)	3,82	12,53	1,46	1,31

Fonte: o próprio autor

Figura 4.9 – Comparação da resistência à flexo-tração segundo o tipo de agregado



Fonte: o próprio autor

Na Tabela 4.9 pode ser observado que a escória apresentou o maior coeficiente de variação quando comparado aos outros 3 agregados, isso se explica pela diminuição de pontos de contato causada pela sua granulometria uniforme e pela malta de areias e finos.

Segundo a Figura 4.9, o RCC de bloco de concreto e a escória tiveram os melhores resultados mesmo tendo composições granulométricas diferentes. O que leva a pensar que o teor de agregados miúdos e finos tem uma grande influência nesta propriedade.

Na resistência a flexo-tração, a escória teve a maior resistência a flexo-tração como mostrado na Figura 4.9, explicada porque a ponte de aderência entre os grãos foi dada pela pasta, a qual tinha maior resistência que o agregado por ter um consumo de cimento tão alto e uma relação água/cimento tão baixa.

Depois da escória o material com maior resistência a flexo-tração foi o RCC de concreto que teve uma porcentagem de argamassa de 35 % neste caso tinha uma argamassa mais resistente pelo teor de areia e finos mais baixo quando comparado ao basalto com 61% e ao RCC cerâmico com 35%, o que leva a pensar que pode existir um porcentagem de argamassa ótimo para ajudar a melhorar esta propriedade.

Finalmente o RCC cerâmico teve os menores resultados explicado pela natureza do agregado.

4.2.4 Porcentagem de Vazios (%)

A medição dos vazios no estado endurecido foi realizada aos 28 dias, utilizando a metodologia enunciada no capítulo 3. Na Tabela 4.10 e a Figura 4.10 apresentam-se as porcentagens de vazios, a média o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada tipo de agregado.

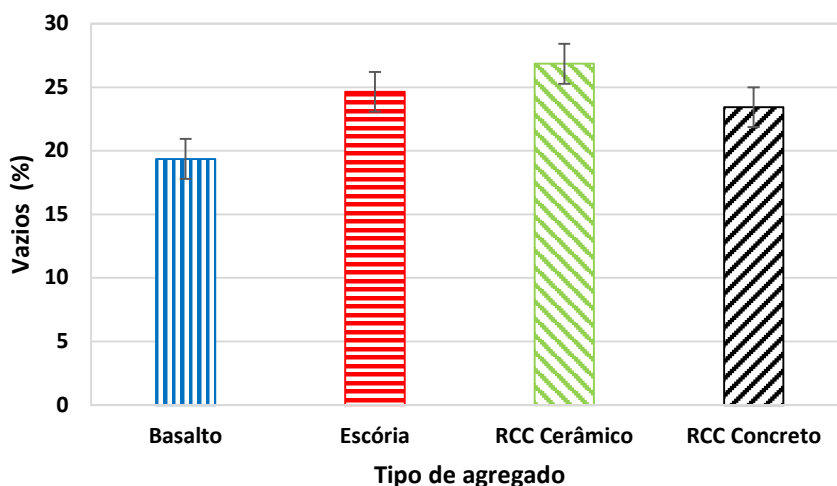
Na Tabela 4.10 é analisado que o RCC de concreto é o material que apresenta maior coeficiente de variação da medição da porcentagem de vazios, explicada pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação.

Tabela 4.10 – Vazios (%) nas misturas de concreto poroso

Tipo de Agregado	Basalto	Escória	RCC Cerâmico	RCC Concreto
Vazios (%)	19,10	25,15	27,69	24,51
	19,42	23,87	28,65	23,87
	19,74	23,87	25,78	23,55
	18,78	26,10	26,10	21,65
	19,74	24,19	25,98	23,55
Média (%)	19,26	24,75	27,06	23,40
Desvio Padrão	0,41	1,08	1,35	1,23
Coeficiente de Variação (%)	2,13	4,38	5,00	5,27

Fonte: o próprio autor

Figura 4.10 – Comparação dos vazios (%) segundo o tipo de agregado



Fonte: o próprio autor

Observa-se, na Figura 4.10 que a porcentagem de vazios nas misturas estudadas variou entre 19 – 28 %, confirmando o encontrado na literatura para este tipo de concreto, que se encontra na faixa de 10 a 35 %.

Nesta propriedade a porcentagem de argamassa influencia diretamente a porcentagem de vazios, isto é, materiais mais argamassados como o basalto apresentaram porcentagem de vazios menor quando comparado ao RCC cerâmico e de concreto. Já no caso da escória a sua porcentagem de 24.75% é explicada primeiro pela sua granulometria uniforme e segundo porque não teve argamassa e sim pasta o que levou a que uma porção dos seus vazios forem preenchidos por ela.

4.2.5 Permeabilidade

Para a avaliação desta propriedade, foram utilizados dois tipos de ensaios: o ensaio de carga variável e o ensaio de carga constante, e obtiveram-se os resultados descritos a seguir.

4.2.5.1 Carga Variável

Na Tabela 4.11 encontram-se os valores obtidos do coeficiente de permeabilidade e a verificação desta segundo a norma ACI 522R-06.

Tabela 4.11 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade k para carga variável

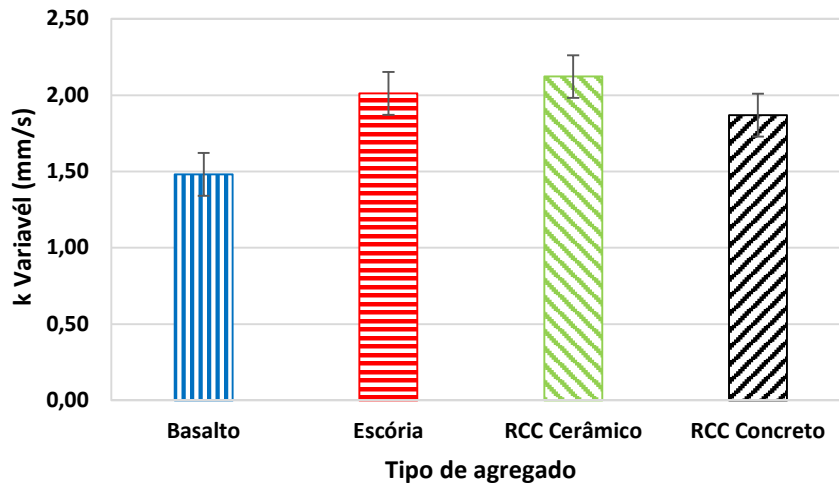
Tipo de Agregados	k (mm/s)	ACI 522R-06
Basalto	1,48	cumpre
Escória	2,01	cumpre
RCC Cerâmico	2,12	cumpre
RCC Concreto	1,87	cumpre

Fonte: o próprio autor

No caso do permeâmetro de carga variável a permeabilidade foi avaliada para todas as misturas, encontrando-se valores de permeabilidade que variam de 1,48 a 2,12 mm/s. Estes valores atendem a norma ACI522R-06 que fixa um valor de permeabilidade mínimo para pavimentos drenantes 1,35 mm/s.

Os coeficientes de permeabilidade encontrados no ensaio de carga variável estão basicamente na mesma faixa numérica, apresentando o mesmo expoente, como pode ser visto na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Comparação entre os coeficientes de permeabilidade para carga variável



Fonte: o próprio autor

Segundo a Figura 4.11 pode-se observar que com este tipo de ensaio não é possível identificar diferenças significativas entre as misturas, já que em média as 4 possuem, praticamente, o mesmo coeficiente de permeabilidade, o que não corresponde com a porcentagem de vazios, como verificado na Tabela 4.10 onde estes variaram significativamente entre as diferentes misturas.

4.2.5.2 Carga Constante

Na Tabela 4.12 e na Figura 4.12 podem ser analisados os resultados deste ensaio para os diferentes concretos pelo ensaio de carga constante.

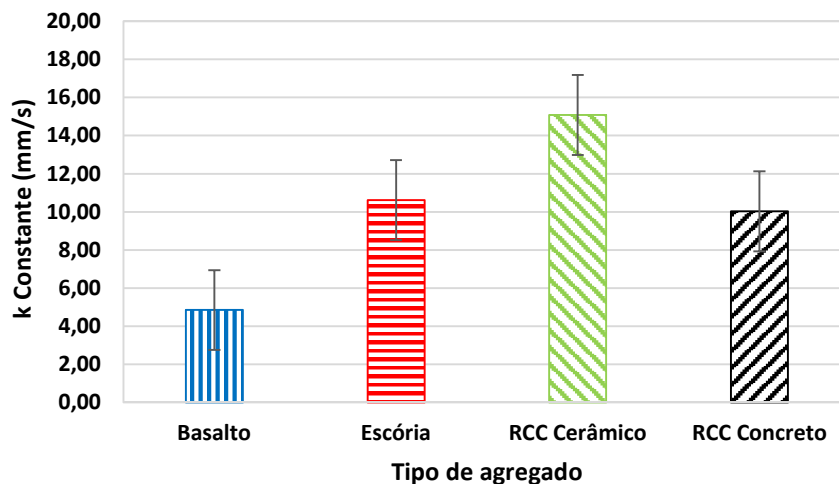
Tabela 4.12 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade para carga constante

Tipo de agregado	k (mm/s)	ACI 522R-06
Basalto	4,85	cumpre
Escória	10,62	cumpre
RCC Cerâmico	15,08	cumpre
RCC Concreto	10,03	cumpre

Fonte: o próprio autor

No caso do ensaio de carga constante a permeabilidade foi avaliada para todas as misturas, encontrando-se valores de permeabilidade que variam de 4,85 a 15,08 mm/s, estes valores são elevados e atendem o exigido pela norma ACI 522R-06.

Figura 4.12 – Comparação coeficiente de permeabilidade k para carga constante



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.12 visualiza-se que o basalto possui o menor coeficiente de permeabilidade K entre as três misturas. Este fato pode ser explicado pela porcentagem de argamassa de 63%, a forma dos grãos e sua composição granulométrica que garante um maior travamento diminuindo esta propriedade.

Por outro lado, a mistura com RCC cerâmico apresentou o maior coeficiente de permeabilidade fato que se explica pela sua composição granulométrica, pela forma e superfície dos grãos. Este agregado apresentava uma forma arredondada, superfície porosa e uma absorção de água de 12%. Estas características contribuíram a formação de mais vazios interconectados explicando o aumento do coeficiente de permeabilidade conforme pode ser observado na Figura 4.9.

4.2.6 Desgaste

O ensaio de cantabro, que mede a perda de massa por desgaste foi realizado nas quatro misturas. O procedimento do ensaio foi realizado como indicado

no capítulo 3. A Figura 4.13 apresentam-se os corpos de prova depois do ensaio de desgaste.

Figura 4.13 – Corpos de prova do ensaio de desgaste

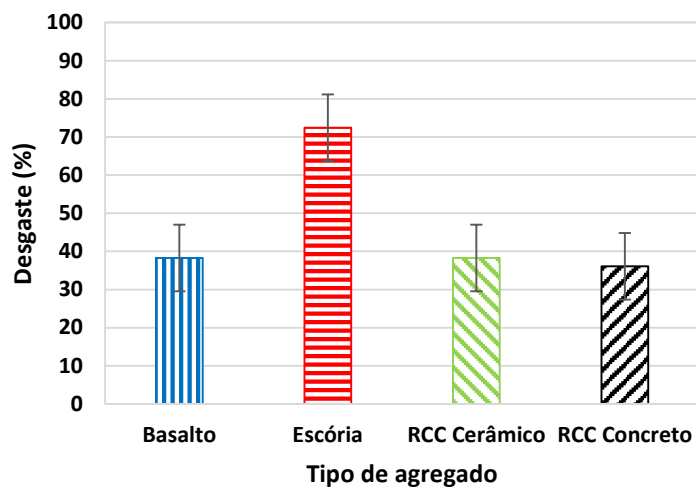


Fonte: o próprio autor

Da Figura 4.13 pode ser analisado que nos corpos de prova de basalto houve uma ruptura na interfase das duas camadas compactadas por causa do processo de compactação explicado no capítulo 3. Já no caso da escória é claro que é o material com maior desgaste causado pela desagregação do material durante o ensaio.

Na Figura 4.14 estão os resultados de desgaste obtidos mediante o ensaio de cantabro.

Figura 4.14 – Resistência ao Desgaste



Fonte: o próprio autor

Como apresentado na Figura 4.14 a escória teve o maior desgaste, só que neste ensaio o desgaste se dá por causa dos impactos que sofre o material com as paredes da máquina de los angeles causando uma desagregação. Este mesmo fato foi analisado por Dong *et al.* (2013) aonde concluem que o desgaste do material vai ser produzido pelos impactos que ele sofre durante os 300 ciclos de ensaio.

A argamassa e a pasta formada no concreto poroso vão influenciar diretamente a resistência ao desgaste, já que vão levar a pontes de aderência mas fortes o mais fracas dependendo da qualidade da argamassa ou da pasta formada como mostrado na Figura 4.14.

Concretos argamassados como o basalto, o RCC cerâmico e o RCC de concreto apresentaram desgaste de aproximadamente 38%, explicado pela grande influência da argamassa nesta propriedade.

4.3 Análise estatística dos resultados

No caso deste estudo em particular, trata-se da avaliação de variáveis quantitativas contínuas, uma vez que podem ser calculadas numericamente.

Por isso foi realizado um análise de variâncias levando em consideração que quando o p-valor for menor do que 5% (0,05) existiria diferença significativa entre as propriedades estudadas.

Foram calculados os graus de liberdade (g.l.), a soma dos quadrados (SQ), os quadrados médios (MQ), e finalmente o teste F para análise de variâncias.

4.3.1 Resistência à compressão

Considerando um nível de significância de 1% e um fatorial de 4x3, para ter uma interpretação ótima do comportamento dos materiais, foi necessário fazer um análise de variâncias e avaliar a diferença significativa entre elas, como mostrado na Tabela 4.13.

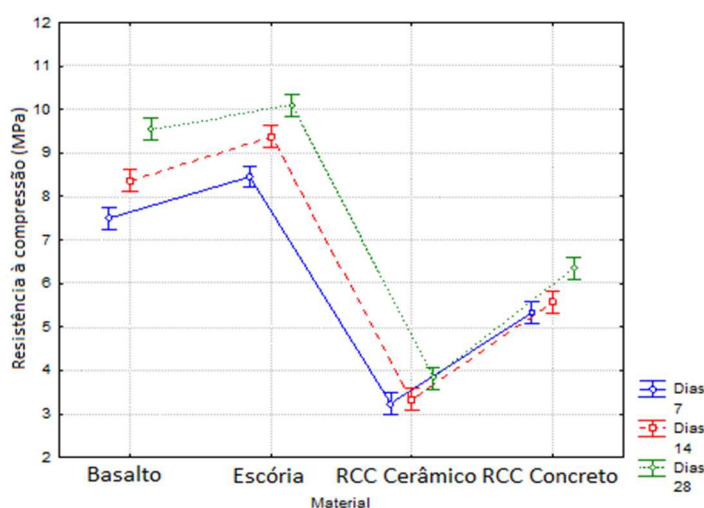
Tabela 4.13 – Análise de variâncias da resistência à compressão

Fontes de Variação	g. l.	SQ	MQ	F	p-valor
Material	3	447.490	149.163	1336.74	0.000000
Dias	2	25.037	12.519	112.19	0.000000
Material*Dias	6	4.847	0.808	7.24	0.000005
Erro	72	8.034	0.112		
Total	83	485.410			

Fonte: o próprio autor

Com p-valor de 0.000005 verifica-se que existem diferenças significativas na interação dos materiais e o tempo na variável resistência à compressão. Portanto é importante analisar de forma independente os efeitos dessa interação. Esse efeito pode ser observado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Comparação das resistências médias a compressão



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.15 é claro que a RCC cerâmico e o RCC de concreto mostram diferenças significativas comparados com os outros materiais analisados. Por outro lado o Basalto e a Escória não apresentam diferença significativa entre eles.

Analisando a evolução da resistência nas três idades estudadas é claro que o RCC cerâmico não tem diferença entre a resistência à compressão aos sete dias e aos quatorze dias, e que as resistências encontradas em média tem o mesmo valor.

No caso do basalto, em termos de evolução a resistências é claro que para os quatorze e vinte oito dias não mostra diferença significativa quando comparadas com as resistências aos 7 e 14 dias da escória.

As diferenças significativas entre os materiais se explicam pela natureza dos agregados utilizados.

Já as diferenças quanto a evolução são explicadas pela interferência dos agregados miúdos e finos de cada uma das composições granulométricas.

4.3.2 Resistência à flexo-tração

Da mesma forma, considerando um nível de significância de 1% foi realizado a análise de variâncias para resistência à flexo-tração, como pode ser visto na Tabela 4.14.

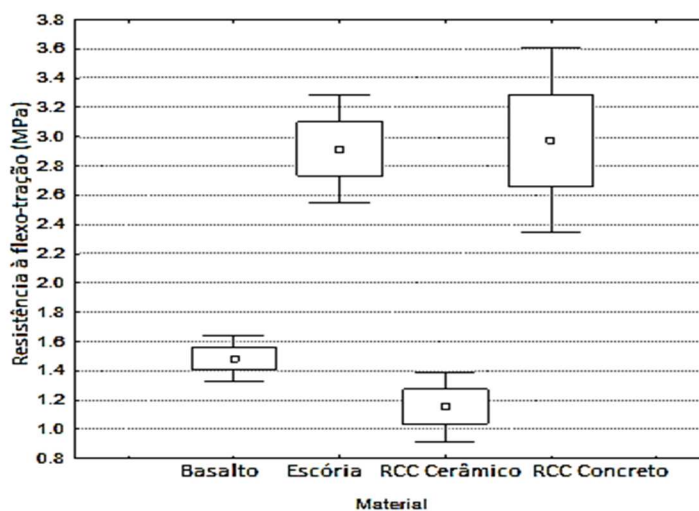
Tabela 4.14 – Análise de variâncias resistência à flexo-tração

Fontes de Variação	g. l.	SQ	MQ	F	p-valor
Material	3	10.80317	3.60106	23.5136	0.000026
Erro	12	1.83778	0.15315		
Total	15	12.64094			

Fonte: o próprio autor

Com p-valor de 0.000026, verifica-se que existem diferenças significativas entre os materiais considerando a variável flexo-tração, como também pode ser observado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Comparação das resistências médias à flexo-tração



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.16 é claro que o basalto e o RCC cerâmico tem diferencia significativa com todos os materiais. Já o RCC de concreto e a escória não mostram uma diferença significativa entre eles.

A explicação para o RCC de concreto e a escória não apresentar diferença significativa é basicamente porque os dois materiais tem porcentagens de vazios similares de aproximadamente 25%. O RCC de concreto aumento sua resistencia pelo travamento dos grãos devido a sua granulometria descontinua, e a escória teve uma diminuição de resistencia pela granulometria uniforme e pelas pontes de contato entre os grãos serem muito frágeis.

Finalmente o RCC cerâmico apresentou o menor valor quanto à resistência à flexo-tração que se explica pela natureza do agregado.

4.3.3 Porcentagem de Vazios (%)

No caso da porcentagem de vazios (%), foi feita a análise de variâncias para realizar a verificação da existência de diferenças significativas entre os materiais, como pode ser observado na Tabela 4.15.

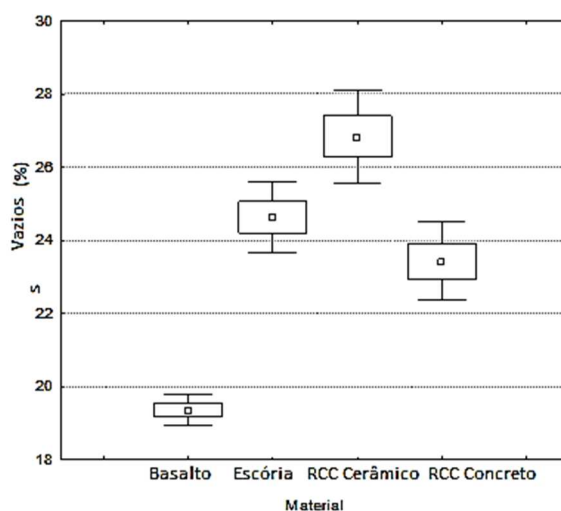
Tabela 4.15 – Análise de variâncias dos vazios (%)

Fontes de Variação	g. l.	SQ	MQ	F	p-valor
Material	3	148.04	49.35	51.13	0.000000
Erro	16	15.44	0.97		
Total	19	163.48			

Fonte: o próprio autor

Com p-valor de 0.000000 verifica-se que existem diferenças significativas entre os materiais considerando a variável porcentagem de vazios (%) como pode ser observado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Comparação das porcentagens de vazios médias



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.17, é notório que o basalto apresenta uma média significativamente inferior do que os outros materiais, levando a que este material tenha diferença significativa com todos os materiais. Fato explicado pela porcentagem de argamassa formada pelas areias e os finos próprio do material.

Já no caso da escória e do RCC de concreto, não há diferença significativa entre eles, mesmo tendo granulometrias diferentes, isto se explica porque a escória na sua composição granulométrica não tem agregados miúdos nem finos por tanto os grãos foram recobertos somente por pasta de cimento, o que levou em muitos casos a que esta pasta tampasse e isolasse muitos dos vazios do material.

Finalmente o RCC cerâmico, apresenta diferença significativa com os outros três materiais, explicado pela sua composição granulometria além da absorção natural do agregado.

4.3.4 Permeabilidade

No intuito de definir qual dos dois ensaios é o mais fiel na medição desta propriedade foi feita uma comparação das médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados encontrados nas duas metodologias utilizadas, como mostrado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Comparação dos parâmetros estatísticos para os dois tipos de ensaios

	Material	Nº elementos	Média (mm/s)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
CARGA VARIÁVEL	Basalto	8	1.481	0.1008	68.06
	Escória	8	2.012	0.1380	68.59
	RCC Cerâmico	8	2.123	0.1482	69.81
	RCC Concreto	8	1.869	0.1211	64.79
CARGA CONSTANTE	Basalto	13	4.8523	0.4939	10.18
	Escória	13	10.615 4	1.0605	9.99
	RCC Cerâmico	13	15.079 2	0.1786	1.18
	RCC Concreto	13	10.028 5	0.5127	5.11

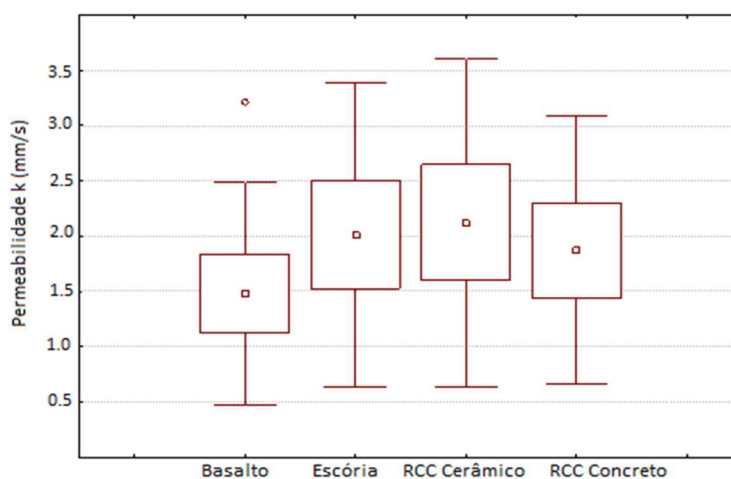
Fonte: o próprio autor

Verifica-se na Tabela 4.17 que o ensaio de carga variável possui os maiores coeficientes de variação que são aproximadamente de 68%, tal variação não é dada pelo material mas sim pelo tipo de ensaio.

Já no caso do ensaio de carga constante o coeficiente de variação diminui para valores até 10 % aproximadamente. Esta variação neste tipo de ensaio vai depender do tipo de material ensaiado.

Finalmente o ensaio que mais se ajustou as propriedades hidráulicas do material foi o ensaio de carga constante, que mostrou a menor variabilidade de resultados e os valores mais aproximados desta propriedade. Pesquisadores da Universidade Tecnológica de Tennessee recomendam o uso do ensaio de carga constante, visto que, o k é uma função direta da porcentagem de vazios do material e do tamanho dos vazios. A comparação em média dos resultados dos ensaios de permeabilidade a carga variável e carga constante se encontram nas Figuras 4.18 e 4.19 respectivamente.

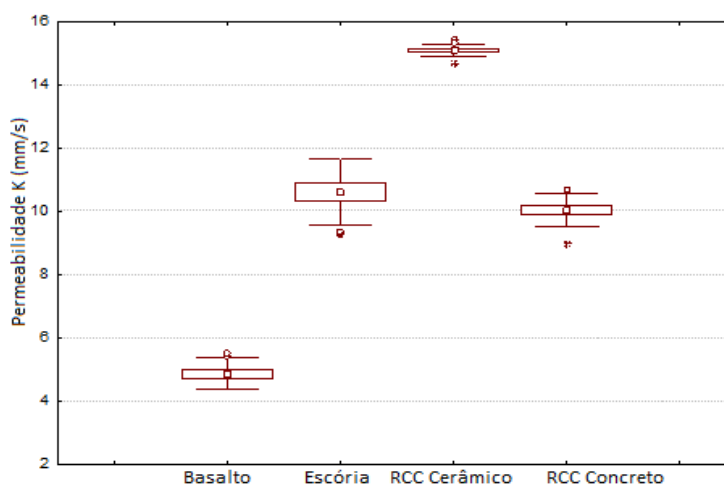
Figura 4.18 – Análise estatístico da permeabilidade k para carga variável



Fonte: o próprio autor

Na Figura 4.18 pode ser concluído que mediante o ensaio de permeabilidade a carga variável os materiais ensaiados não tem diferença significativa, isto é, que em média todos os materiais possuem o mesmo coeficiente de permeabilidade. Na Figura 4.19 encontra-se o análises estatísticos do coeficiente de permeabilidade para o ensaio de carga constante.

Figura 4.19 – Análise estatístico permeabilidade k para carga constante



Fonte: o próprio autor

No caso do ensaio de carga constante na, Figura 4.19, visualiza-se que o RCC cerâmico difere dos outros materiais significativamente, possuindo em média um valor elevado de permeabilidade confirmado pela porcentagem de vazios e pela resistência à compressão.

Já na escória e o RCC de concreto não ocorre diferença significativa entre eles por tanto em média as suas permeabilidades são iguais o que é confirmado pela porcentagem de vazios.

Finalmente conclui-se que o ensaio de carga variável não conseguiu perceber a diferença de permeabilidade independente da variação de porcentagens de vazios e do material. Já o ensaio de carga constante consegue diferenciar as permeabilidades correspondendo com os resultados obtidos na medição de vazios. A dispersão dos resultados é baixa, por tanto este tipo de ensaio que o que mais se adapta às condições do material.

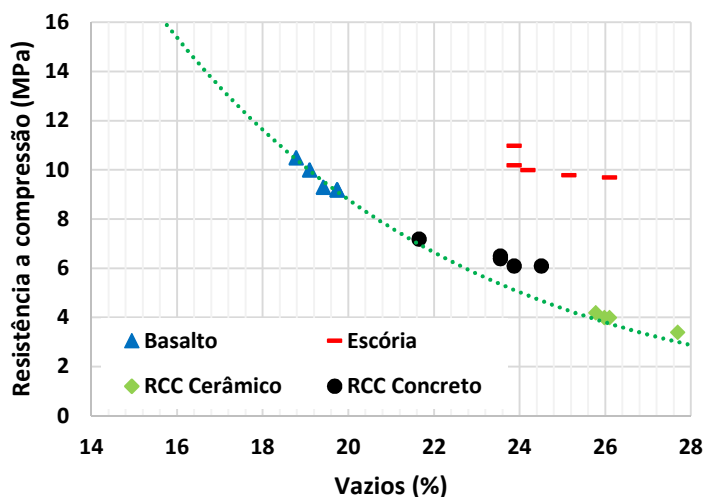
4.4 Correlações

Para melhor interpretar os resultados da segunda campanha experimental foi realizado uma análise de correlação entre as propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais.

As propriedades correlacionadas foram escolhidas por terem sido avaliadas nos mesmos corpos de prova, logo, são resultados confiáveis.

Na Figura 4.20 pode ser observada a correlação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios.

Figura 4.20 – Correlação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios



Fonte: o próprio autor

Esta correlação tem uma tendência exponencial como mostrado na Figura 4.20 e na Tabela 4.17.

Tal tendência pode ser explicada considerando que a curva nunca cortará os eixos, ou seja, jamais ocorrerá uma resistência infinita nem uma porcentagem de vazios igual a 100%.

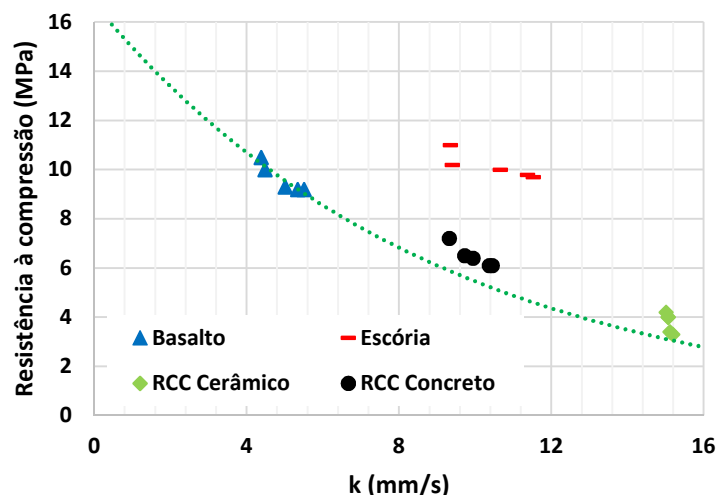
Os parâmetros que mais influenciaram nesta correlação foram: a natureza do agregado, a composição granulométrica, o teor de agregados miúdos e finos.

Pode-se observar na Figura 4.20 que a escória não se ajustou a tendência exponencial. Este resultado é consequência de sua granulometria uniforme somado a falta de agregados miúdos e finos, gerando contatos entre os grãos somente pela pasta cimentícia.

Em contrapartida, os materiais que continham maior teor de agregados miúdos e finos, ou seja, mais argamassados, apresentaram um melhor ajuste, o que pode ser comprovado para as misturas de basalto, RCC cerâmico e de concreto.

Na Figura 4.21 pode ser observada a correlação entre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade para carga constante.

Figura 4.21 - Correlação entre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade para carga constante



Fonte: o próprio autor

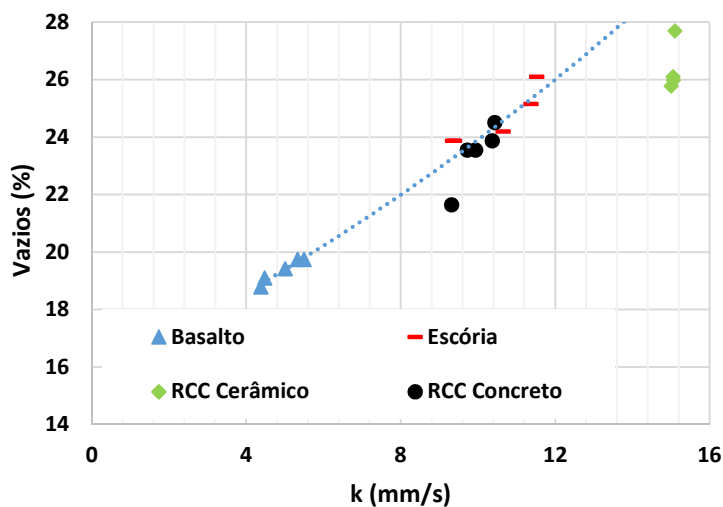
Da Figura 4.21 se pode concluir que a relação da resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade k também apresenta uma tendência exponencial.

Os fatores que influenciaram esta correlação foram a distribuição granulométrica, e a porcentagem de vazios.

Neste caso, igual ao anterior, a escória também não apresentou um ajuste exponencial, explicado pela influência da distribuição granulométrica e pela falta de agregados miúdos e finos.

Na Figura 4.22 pode ser observada a correlação entre a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade para carga constante.

Figura 4.22 – Correlação entre a porcentagem de vazios e o coeficiente de permeabilidade para carga constante



Fonte: o próprio autor

Da Figura 4.22 conclui-se que a relação do coeficiente de permeabilidade k e a porcentagem de vazios é uma relação exponencial.

Os fatores que influenciaram esta correlação foram a distribuição granulométrica e o teor de agregados miúdos e finos de cada material, ou seja, de argamassa.

O material que apresentou o melhor ajuste foi o basalto, conforme Figura 4.20. Observa-se que para o maior coeficiente de permeabilidade maior o teor de vazios.

A escória foi o material que apresentou o menor coeficiente de correlação justificado pela falta de agregados miúdos e de finos, ou seja, argamassa.

Finalmente as equações de correlação para as propriedades mencionadas anteriormente encontram-se na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Equações de correlação entre as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto poroso

Material	Correlações		
	fc vs V (%)	fc vs k	k vs V (%)
Basalto	$fc = 143,85e^{-0,14*V(\%)}$ R ² =0.94	$fc = 16,764e^{-0,112*k}$ R ² =0.87	$k = 0,0481e^{0,2391*V(\%)}$ R ² =0.95
Escória	$fc = 25,751e^{-0,038*V(\%)}$ R ² =0.54	$fc = 15,49e^{-0,041*k}$ R ² =0.72	$k = 1,0948e^{0,0914*V(\%)}$ R ² =0.77
RCC Cerâmico	$fc = 35,81e^{-0,084*V(\%)}$ R ² =0.96	$fc = 3E10e^{-1,512*k}$ R ² =0.86	$k = 13,8e^{0,0033*V(\%)}$ R ² =0.89
RCC Concreto	$fc = 27,283e^{-0,062*V(\%)}$ R ² =0.94	$fc = 26,145e^{-0,141*k}$ R ² =0.93	$k = 3,8715e^{0,0403*V(\%)}$ R ² =0.83

Fonte: o próprio autor

Da Tabela 4.17 pode se concluir que os constantes de cada uma das equações vão depender da natureza do agregado e da composição granulométrica. Destaca-se que estes foram as variáveis da segunda campanha experimental. As equações apresentadas na Tabela 4.17 indicam o comportamento dos materiais sob as condições estudadas e analisadas.

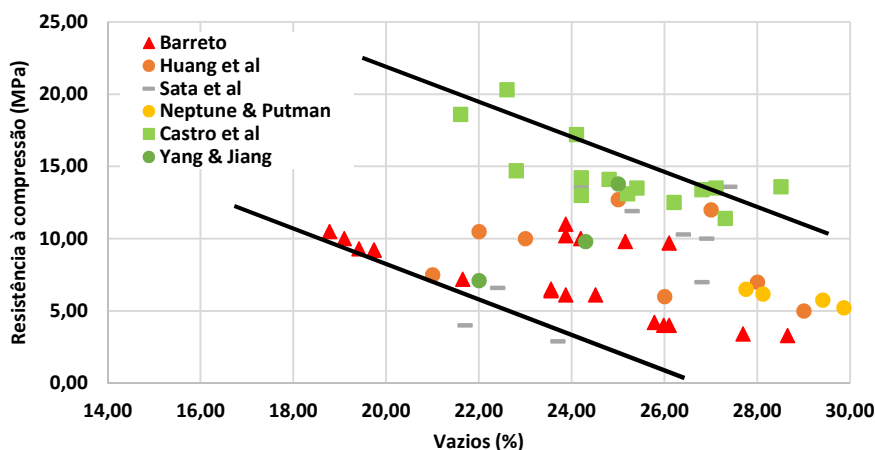
4.5 Comparação dos resultados com outras pesquisas

No intuito de refinar a análise dos resultados, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos com os resultados levantados em outras pesquisas.

4.5.1 Resistência à compressão (MPa) e a porcentagem de vazios (%)

A relação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios (%) obtidas nesta pesquisa e as encontrados na revisão bibliográfica encontram-se na Figura 4.23. Os autores estudados foram: Huang *et al.* (2010), Sata *et al.* (2013), Neptune & Putman (2010), Yang & Jiang (2002).

Figura 4.23 – Relação entre a resistência à compressão e a porcentagem de vazios (%)



Fonte: o próprio autor

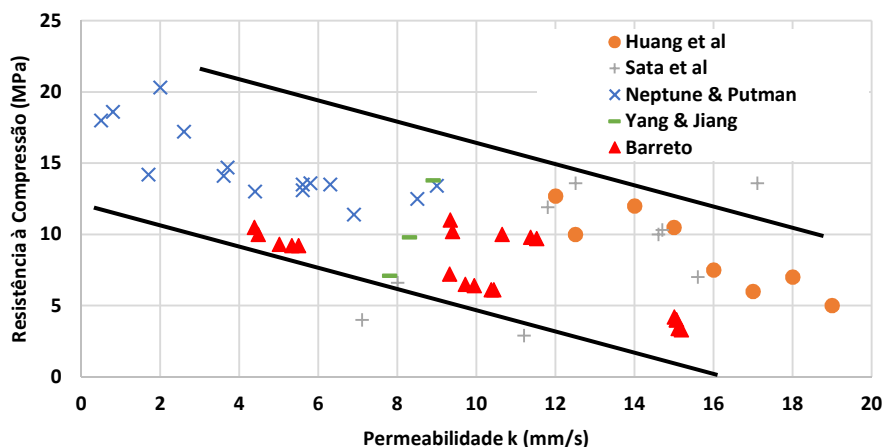
Como pode ser observado na Figura 4.23 a tendência é exponencial e os resultados desta pesquisa são similares com as pesquisas consultadas. A faixa de valores plotada no gráfico foi retirada da revisão bibliográfica onde se conclui que normalmente a porcentagem de vazios varia de 15 a 25% e a resistência à compressão de 5 a 20 MPa.

Na Figura 4.23 pode ser analisado que os melhores resultados na compressão foram encontrados por Castro *et al* (2009). Destaca-se que os autores utilizaram como aglomerante o cimento CPV-ARI, agregados graúdos de basalto e adicionaram aditivo superplastificante, o que permitiu diminuir a relação a/c e como consequência aumentar a resistência.

4.5.3 Resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade k

A relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade k para todas as misturas ensaiadas nesta pesquisa e as encontradas na revisão bibliográfica encontram-se na Figura 4.24. Os autores estudados para esta correlação são: Huang *et al.* (2010), Sata *et al.* (2013), Neptune & Putman (2010), Yang & Jiang (2002).

Figura 4.24 – Relação da resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade k



Fonte: o próprio autor

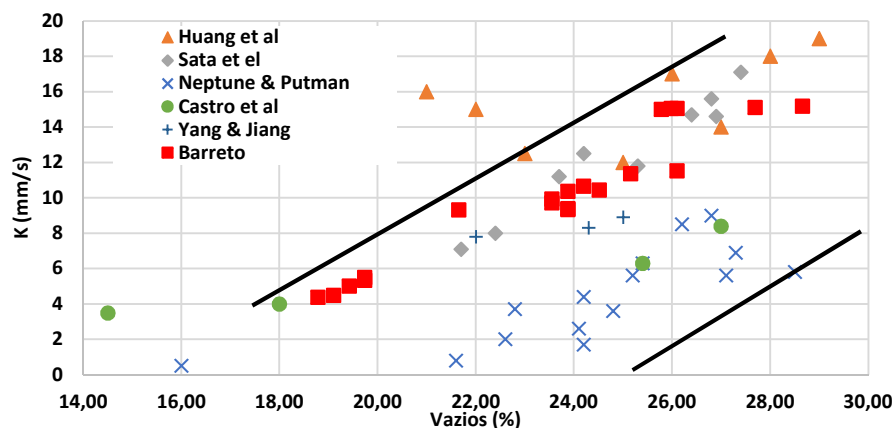
Na Figura 4.24 se pode visualizar que não existe uma grande dispersão dos dados tanto no que se refere aos ensaiados nesta pesquisa quanto os dados coletados da revisão bibliográfica, ficando evidente que quanto maior é a resistência à compressão menor é o coeficiente de permeabilidade.

Do levantamento bibliográfico realizado e dos dados obtidos nos ensaios, verifica-se que a resistência à compressão variou de 5 a 20 MPa e os coeficientes de permeabilidade de 2 a 19 mm/s, apresentando uma tendência exponencial, o que confirma o encontrado neste trabalho.

4.5.1 Coeficiente de permeabilidade k e porcentagem de vazios (%)

A relação entre o coeficiente de permeabilidade k e a porcentagem de vazios realizadas neste trabalho e as obtidas em outras pesquisas se encontram na Figura 4.25. Os dados foram retirados dos seguintes autores: Huang *et al.* (2010), Sata *et al.* (2013), Neptune & Putman (2010), Castro *et al.* (2009), Yang & Jiang (2002).

Figura 4.25 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade k e a porosidade (%)



Fonte: o próprio autor

Como observado na Figura 4.25 a tendência é linear e os resultados desta pesquisa são similares com as pesquisas relacionadas. A faixa de valores sinalada no gráfico foi escolhida da revisão bibliográfica onde se conclui que normalmente a porcentagem de vazios está entre 15 a 25 % e ao coeficiente permeabilidade varia de 4 a 18 mm/s.

Huang *et al* (2010) encontraram coeficientes de permeabilidade na faixa de 12 a 20 mm/s, e porcentagem de vazios de 20 a 30%. Os agregados por eles estudados tinham granulometria descontínua o que contribuiu para a formação de maior porcentagem de vazios e por tanto maior coeficiente de permeabilidade.

Castro *et al* (2009) obtiveram resultados mais baixos quanto ao coeficiente de permeabilidade e a porcentagem de vazios, explicado pelo método de compactação utilizado no trabalho desses autores. Eles usaram um rolo para compactar, explicando assim a diminuição da porcentagem de vazios e do coeficiente de permeabilidade.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nas duas campanhas experimentais, verifica-se o cumprimento do objetivo geral proposto de avaliar o desempenho mecânico e hidráulico do concreto poroso com agregados sustentáveis. Sendo estes agregados oriundos de basalto, de escória siderúrgica e resíduos de construção civil cerâmicos e de concreto.

Os ensaios realizados na primeira e na segunda campanha experimental para avaliar o desempenho dos materiais permitiram verificar que é viável o uso de agregados sustentáveis na fabricação de concreto poroso.

Verifica-se também o cumprimento dos objetivos específicos definidos no trabalho, de estabelecer o tempo de mistura para concreto poroso e estudar a interação pasta-agregado graúdo e sua relação com as propriedades mecânicas e hidráulicas do material.

No caso do tempo de mistura foi definido um tempo de 5 minutos, o qual foi o tempo necessário para ter uma mistura homogênea conservando uma consistência e trabalhabilidade adequada para a manipulação e moldagem dos corpos de prova.

Frente a interação pasta agregado graúdo conclui-se que, a pasta ou argamassa formada pelo aglomerante e os agregados miúdos e finos contribuíram para a melhoria da ponte de contato entre os agregados, principalmente, no que se refere resistência à flexo-tração.

No caso da resistência à compressão conclui-se que, para agregados de basalto o uso de granulometrias continua levou a um ganho representativo nesta propriedade do material, graças a redução das tensões de aderência e o aumento dos pontos de contato entre os grãos, por isso, o material apresentou uma melhor distribuição de esforços frente aplicação de carga.

Já para os agregados sustentáveis foi mais preponderante a natureza mineralógica do agregado do que a distribuição granulométrica do mesmo.

Em relação com as propriedades hidráulicas do material, conclui-se que a distribuição granulométrica tem uma grande influência na porcentagem de vazios internos, já que granulometrias uniformes resultam em uma maior porcentagem de vazios quando comparadas com granulometrias contínuas. Mas essa relação também está muito ligada ao teor de agregados miúdos e finos de cada material que, junto com o cimento formam pasta ou argamassa podendo resultar na redução dos vazios.

A permeabilidade está diretamente ligada à porcentagem de vazios do material. Por isso, da mesma forma esta influenciada pela distribuição granulométrica e a compactação.

Da medição do coeficiente de permeabilidade, conclui-se que o ensaio de permeabilidade de carga variável da norma NBR 14545/2000 não é sensível para medir a permeabilidade de concreto poroso, mesmo com porcentagens de vazios diferentes, além de ter uma grande dispersão nos valores encontrados.

O ensaio de permeabilidade a carga constante é sensível na medição de permeabilidade de concreto poroso com porcentagens de vazios diferentes, mantendo a correlação que quanto maior for a porcentagem de vazios maior será a permeabilidade.

Finalmente os agregados sustentáveis apresentaram um desempenho aceitável sob as condições de pesquisa, levando em consideração que não foi utilizado aditivos químicos nem adições minerais.

5.1 Recomendações para pesquisas futuras

Para futuras pesquisas é recomendável melhorar o processo de adensamento, já que este vai influenciar diretamente as propriedades mecânicas e hidráulicas do material. Seria aconselhável trabalhar com placas e extrair testemunhos para a avaliação do desempenho do material já que se avaliariam as condições reais de campo.

No intuito de melhorar a interação agregado-agregado tem-se que procurar a incorporação de um polímero que possa dar uma maior aderência da

pasta ou argamassa no agregado e assim aumentar a ligação entre estes garantindo um ganho nas propriedades mecânicas e a durabilidade do material.

O ensaio de carga constante poderia ser refinado, levando em consideração que é um ensaio que precisa de mais de uma pessoa para levar a cabo as medições. Por tanto, se poderiam diminuir as dimensões do equipamento e tentar digitalizar a entrada e saída de água para ajustar assim os possíveis erros de medição.

Na tentativa de conhecer melhor o desempenho do material poderia ser feita uma equação de comportamento do material, para isto tem que se trabalhar nos extremos, ou seja utilizar no começo concreto convencional e diminuir os agregados miúdos até obter concreto poroso, mantendo constante o consumo de cimento a relação água-cimento, o processo de adensamento, e as condições de cura.

Podem ser implementados o uso de aditivos químicos plastificantes ou superplastificantes, já que a manipulação do material por ser uma mistura seca se torna difícil. Sendo assim, o uso de aditivos vai permitir dar uma maior plasticidade na mistura e ter um ganho nas propriedades mecânicas finais do material.

6. BIBLIOGRAFIA

CADORIN & DE MELLO, Acco Cadorin, D. & de Mello, N. A., **Efeitos da impermeabilização dos solos sobre a arborização no município de Pato Branco-PR** (Mestrado)-UTFPR, Curitiba, 2012.

ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. (Mestrado)-UFRGS, Porto Alegre, Março. 2005.

A.S. AGAR OZBEK *et al.*, Agar Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E. & Breugel, K. Dynamic behavior of porous concretes under drop weight impact testing. **Cement & Concrete Composites**, v. 39. p. 1-11, mar. 2013.

A.S. AGAR OZBEK *et al.*, Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E. & Breugel, K.. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480-490, dez. 2013.

F. AGRELA *et al.*, Francisco A., Auxi B., Antonio R., Jesús A., María D. C., José R. J. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. **Resources, Conservation and Recycling**,v. 58, p. 98-106, nov. 2012.

AOKI, Y., **Development of pervious concrete**.(Master)-University of Technology, Sydney, Sydney, june, 2009.

Azzout, e. B. s. C. f. A. e., **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris: s.n. 1994.

A. BARBUDO *et al.*, A. Barbudo, F. Agrela, J. Ayuso, J.R. Jiménez, C.S. Poon. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 129-138, jul. 2012.

M. AAMER RAFIQUE BHUTTA *et al.*, Muhammad A. R. B., Nor H., Nur F., Mohd W. H., Mahmood Md T., J. M., Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243-1248, jun. 2013.

M. A.R. BHUTTA *et al.* Muhammad A. R. B., Tsuruta, K. & Mirza, J., Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67-73, jan. 2012.

G.A. BLENGINI, E. GARBARINO, Gian Andrea B., Elena G., Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1021-1030, fev. 2010.

G.A. BLENGINI *et al.*, Gian Andrea B., Elena G., Slavko S., Deborah J. S., Tamás H., Raffaele V., Zacharias A., Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa). **Journal of Cleaner Production**, v. 27, p. 177-181, jan. 2012.

B. W.-B.*et al.*, **The Suds Manual**. CIRIA. London, 2007.

CASTRO *et al.*, Javier C., Hernán de S., Carlos V., Bonifacio F., Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, p. 271-284, out. 2009.

Y. CHEN *et al.*, Yu C., Kejin W., Xuhao W., Wenfang Z., Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 97-104, fev. 2013.

P. CHINDAPRASIRT *et al.*, P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 894-901, fev. 2008.

M. CHOPRA *et al.*, Chopra, M., Wanielista, M. & Mulligan, A. . M., **Compressive Strength of Pervious Concrete Pavements**, Orlando: University of Central Florida, 2007.

E. COLERI *et al.*, Erdem C., Masoud K., John T. H., Kai Y., John M. B.. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 164-172, ago. 2013.

COLÔMBIA HUMANITARIA, **Resumen de instructivos de apoyo**, Fondo Nacional de Calamidades, Bogotá, 2011.

CONCRETE CONSTRUCTION, 2012. **Concrete Construction**. Disponível em: <<http://www.concreteconstruction.net/pervious-concrete/colored-pervious-concrete-fits-the-bill.aspx>>. Acesso em 14 Out. 2013.

CONCRETE NETWORK, 1999. **Concrete Network**. Disponível em: <<http://www.concretenetwork.com/concrete/greenbuildinginformation/sobering.html>>. Acesso em 10 Out. 2013.

CONCRETE NETWORK, 1999. **Concrete Network**. Disponível em: <http://www.concretenetwork.com/concrete/pool_decks/safety.html>. Acesso em 16 Out. 2013.

CONCRETE PROMOTION GROUP, **Handbook for Pervious Concrete Certification in Greater Kansas City**, Concrete promotion group. Kansas, 2012.

COPEL, 2008. **Copel**. Disponível em: <<http://www.tuboscopel.com.br/moldados-geral.php>>. Acesso em 17 Out. 2013.

CÔRTEZ, J. M., **Sistemática de auxílio a decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas**.(Doutorado) UNB, Brasília: 2009.

CRUZ ROJA ESPAÑOLA, **Plan de acción ante las situaciones de vulnerabilidad originadas por las inundaciones en República Dominicana y Haití**, Cruz Roja, Madrid, 2004.

O. DEO, N. NEITHALATH, Omkar D., Narayanan N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, p. 402-412, set. 2010.

O. DEO, N. NEITHALATH, Omkar D., Narayanan N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4181-4189, maio. 2011.

Q. DONG *et al.*, Qiao D., Hao W., Baoshan H., Xiang S., Kejin W. Investigation into Laboratory Abrasion Test Methods for Pervious Concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 25, p. 886-892, jul. 2013.

G. A. C., **Relatório Anual 2011**, RIO DE JANEIRO: GREENPEACE.2011

C. GAEDICKE, *et al.*, Gaedicke, C., Marines, A. & Miankodila, F., A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 494-503, dez. 2013.

G. C. I., 2009. **Gilson Company, Inc**. Disponível em: <<http://www.globalgilson.com/productdisplay.asp?group=%20NCATAsphaltFieldPermeameter>>. Acesso em 10 Set. 2013.

N. GHAFORI & S. DUTTA, Nader G., Shivaji D. Laboratory Investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. **Journal of materials in civil engineering**, v. 7, p. 183-191, ago. 1995.

R. GUPTA, Rishi G. Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia — A pilot study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 1, p. 1-9. out. 2014.

S. HESAMI *et al.*, Saeid H., Saeed A., Mahdi N., Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680-691, nov. 2014.

B. HUANG *et al.*, Baoshan H., Hao W., Xiang S., Edwin G. B. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818-823, nov. 2010.

A. IBRAHIM *et al.*, Ahmed I., Enad M., Mohammed Y., Varun C. P. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, out. 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2009. **Aço Brasil**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>>. Acesso em 20 Ago. 2013.

INSTROTEK INC, 2012. **Instrotek**. Disponível em: <<http://instrotek.com/material-testing/laboratory-products/corelok/>>. Acesso em 17 Abr. 2014.

M. KAYHANIAN *et al.*, Masoud K., Dane A., John T. H., David J., Balasingam M. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. 114-123, nov. 2012.

KEVERN *et al.*, Kevern, J. T., Wang, K. & Schaefer, V. R., Predicting Performance of Pervious Concrete using Fresh Unit Weight. Iowa: **NRMCA Concrete Technology Forum**. maio. 2009.

KIM, H. & Lee, H., H.K. Kim, H.K. Lee. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 607-615, mar. 2010.

S.-C. KOU *et al.*, Shi-Cong K., Chi-Sun P., Hui-Wen W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 881-889, jul. 2012.

W.-T. KUO *et al.*, Wen-Ten K., Chih-Chien L., De-Sin S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 37, p. 328-335, jan. 2013.

C. LIAN *et al.*, C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4294-4298, jun. 2011.

H. LI *et al.*, Hui L., Masoud K., John T. H. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, v. 118, p. 144-152, fev. 2012.

K. C. MAHBOUB *et al.*, K. C. Mahboub, Jonathan C., Robert R., Thomas R., and Blake D. Pervious Concrete: Compaction and Aggregate Gradation. **ACI materials journal**, v. 106, p. 523-528, dez. 2009.

I. MARIE, H. QUIASRAWI, Iqbal M., Hisham Q. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, p. 243-248, jul. 2012.

W.D. Martin III *et al.*, William D. M. III, Nigel B. K., Bradley J. P. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 78-84, fev. 2014.

H. MEFTEH *et al.*, Houria M., Oussama K., Hocine O., Layachi B., Nourredine A. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 282-288, maio. 2013.

MERIGHI, J. . V., Moura Fortes, R. & Bandeira, A., Estudo da dosagem do concreto poroso para pavimentação:Características mecânicas e hídricas, **IBRACON**. São Paulo, 2007.

MEYER, R. M. T., **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.**(Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, 2001.

N. NEITHALATH *et al.*, Narayanan N., Milani S. S., Omkar D. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials characterization**, v. 61, p. 802-813, maio. 2010.

N. NEITHALATH *et al.*, Narayanan N., Jason W., Jan O. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using Electrical Impedance to Predict Acoustic and Hydraulic Performance. **Cement and concrete research**, v. 36, p. 2074-2085, set. 2006.

A. NEPTUNE & B. PUTMAN, Andrew I. P. N. and Bradley J. P. Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. **ACI materials journal**, v. 107, p. 625-631, dez. 2010.

D.H. NGUYEN *et al.*, Dang Hanh N., Mohamed B., Nassim S., Lydia L., Fabienne B. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 151-160, set. 2013.

N. R. M. C. A., 2010. **Pervious Pavement**. Disponível em:
<<http://www.perviouspavement.org/inspection.html>>. Acesso em 12 Set. 2013.

PARRA ARAQUE, L. M. & Sánchez García, D. P., **Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO**. Muninipio Tuta Boyacá, Universidad de la Salle. Bogotá, 2010.

PAZANI FIGUEIREDO, E., USO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD). **IBRACON** . 2007.

POTOCNIK, J., Orientações sobre as melhores práticas para limitar,atenuar ou compensar a impermeabilização dos solos, Luxemburgo: **Comissão Europeia**. 2012.

PURINTON BUILDERS INC, 2013. **Purinton Builders Inc**. Disponível em: <<http://www.purintonbuilders.com/pervious-concrete.aspx>>. Acesso em 16 Out. 2013.

B.J. PUTMAN & A.I.NEPTUNE, Bradley J. P., Andrew I. N. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3480-3485, mar. 2011.

M.A.R. BHUTTA *et al.*, M. Aamer Rafique B., K. Tsuruta, J. Mirza. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67-73, jan. 2012.

ROHDE, Luciana, Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos- estudo laboratorial. Porto Alegre: **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2002.

V. SATA *et al.*, Vanchai S., Ampol W., Prinya Ch., Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 33-39, fev. 2013.

V. R. SCHAEFER *et al.*, **Mix Design Development for Pervious Concrete in cold weather climates**. **Center for Transportation Research and Education**, Iowa State University, Iwoa, 2006.

SHANGHAI LIMING COMPANY, 2000. **Shanghai Company**. Disponível em: <<http://www.trituradora-piedra.com.mx/equipo/trituradora-de-cono-hidraulica-de-alta-eficiencia-usado-para-triturar-escombros.html>>. Acesso em 24 Mar. 2014.

X. SHU *et al.*, Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3187-3192, mar. 2011.

SONEBI & BASSUONI, M. Sonebi & M. Bassuoni. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147-154, set. 2013.

M.S. SUMANASOORIYA & N. NEITHALATH, Milani S. S., Narayanan N. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 778-787, jun. 2011.

TENNIS *et al.*, Tennis, P. D., Leming, M. L. & Akers, D. J., **Pervious Concrete Paviments**. Portland Cement Association. skokie illinois, 2004.

T. THO-IN *et al.*, Tawatchai Th., Vanchai S., Prinya Ch., Chai J. Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 366-371, dez. 2012.

F. TITTARELLI *et al.*, Francesca T., Maddalena C., Tiziano B. Corrosion behavior of reinforced no-fines concrete. **Corrosion Science**, v. 70, p. 119-126, jan. 2013.

V.A. ULLOA *et al.*, Vivian A. U., Emili García-T., María-José P., Alberto D., and Pedro S. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. **ACI materials journal**, v. 110, p. 687-695, dez. 2013.

UNIVERSIDADE DE CALIFORNIA, 2014. **Uc Davis Extension**. Disponível em: <http://extension.ucdavis.edu/unit/center_for_water_and_land_use/pervious_pavement.asp>. Acesso em 15 Set. 2013.

VÉLEZ, Ligia. M., Permeabilidad y Porosidad en Concreto. **Tecno Lógicas**, pp. 169-187, Medellin, 2010.

H. WU *et al.*, Hao W., Baoshan H., Xiang S., and Qiao D. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 23, p. 697-702, maio. 2011.

YANG & JIANG, Jing Y., Guoliang J. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and concrete Research**, Beijing, v. 33, p.381-386, ago. 2002.

Y. ZAETANG *et al.*, Yuwadee Z., Ampol W., Vanchai S., Prinya Ch. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 585-591, ago. 2013.

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