

WELLINGTON EMÍLIO HILARINO FERNANDES

**CONCRETO PERMEÁVEL PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO
INTERTRAVADA A PARTIR DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS-CPR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
para obtenção do título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F363c
2019
Fernandes, Wellington Emílio Hilarino, 1987-
Concreto permeável para aplicação em pavimentação
intertravada a partir de concreto pós reativos-CPR / Wellington
Emílio Hilarino Fernandes. – Viçosa, MG, 2019.
x, 72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Concreto leve. 2. Permeabilidade. 3. Concreto - Testes
de compressão. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 620.136

WELLINGTON EMÍLIO HILARINO FERNANDES

**CONCRETO PERMEÁVEL PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO
INTERTRAVADA A PARTIR DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS-CPR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2019.

Délio Porto Fassoni

Diôgo Silva de Oliveira

Heraldo Nunes Pitanga

Leonardo Gonçalves Pedroti
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, pelas bênçãos e por conceder-me saúde, força e fé e pela finalização de mais essa etapa em minha vida.

À minha mãe Lourdes, por todo amor, carinho e pelo apoio incondicional em minha formação pessoal e profissional.

Ao Professor Pedroti, amigo de trabalho e orientador, que me acolheu nesse projeto e me guiou durante toda sua execução.

À Professora Rita de Cássia (*in memoriam*), que me apoiou em minha escolha pela pós-graduação e também me acolheu como coorientadora nesse projeto.

Ao Departamento de Engenharia Civil, por permitir cursar o mestrado e pelo apoio durante esse período e aos técnicos e colegas do Laboratório de Materiais de Construção José Dias, José Carlos e Toninho, pelo apoio e incentivo que sempre me deram.

À FAPEMIG, pela bolsa de estágio concedida na realização desse trabalho.

Ao estagiário e amigo Maurício, que muito contribuiu para a realização desse projeto, abraçando-o como causa própria.

À Martins Lanna Mineração, na pessoa do Wender Matosinho, pela doação do agregado graúdo utilizado.

À MC-Bauchemie, representada pelo André, que fez a doação do aditivo empregado na fabricação do CPR.

À Decolores Mármore e Granitos, pela doação do resíduo de granito utilizado nessa pesquisa

Por último, mas não menos importante, aos amigos do Laboratório de Materiais de Construção, os que ainda estão presentes e aos que já partiram, em busca de novos projetos, e a todos amigos, que me desejaram forças e contribuiram de alguma forma para a conclusão desse trabalho.

“Somos herdeiros de nossos próprios atos ”
(André Luiz)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1. Considerações Iniciais	1
2. Objetivos.....	2
3. Justificativa	2
4. Estrutura da Dissertação	3
CAPÍTULO 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1. Pavimento Permeável.....	4
2. Agregado Graúdo	6
3. Concreto Permeável	8
4. Concreto de Pós Reativos – CPR.....	10
5. Tempo de Pega	11
6. Resíduo de Beneficiamento de Granito	13
Referências Bibliográficas	14
CAPÍTULO 2 PRODUÇÃO DE CPR COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE GRANITO.....	21
1. Introdução	21
2. Materiais e Métodos	23
3. Resultados e discussões	27
4. Conclusões	33
Referências Bibliográficas	33

CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO A PARTIR DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS	37
1. Introdução	37
2. Materiais e Métodos	40
3. Resultados e discussões	46
4. Conclusões	51
Referências Bibliográficas	52
CONCLUSÕES GERAIS	55
Sugestões para Trabalhos Futuros	55
ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1-Formas de pavimento permeável: (a) juntas alargadas; (b) áreas vazadas; (c) concreto permeável.....	5
Figura 1-2 - (a) Pavimento executado por meio de placas de concreto permeável; (b) Pavimento executado por meio de concreto permeável moldado in loco.	5
Figura 1-3 - Sistemas de infiltração de pavimento permeável.	6
Figura 1-4-Possíveis formas dos grãos de agregados.....	7
Figura 1-5-Classificação da composição granulométrica dos agregados.....	8
Figura 1-6- Aspecto construtivo da passarela de Sherbrook, Canadá.	11
Figura 1-7- Avaliação do tempo de pega por meio de propagação de pulsos ultrassônicos. ...	12
Figura 2-1-Aspecto construtivo da passarela de Sherbrook, Canadá.	22
Figura 2-2-Corpos-de-prova de CPR, cilíndricos e prismáticos: (a) logo após a moldagem na câmara úmida; (b) após serem desenformados, antes de seguirem para o tanque de cura.	26
Figura 2-3-Aparelho de propagação de ondas utilizado na medição do tempo de pega do CPR.	27
Figura 2-4- Granulometria do resíduo de beneficiamento, cimento e da sílica.....	28
Figura 2-5-Imagens por meio da microscopia eletrônica por varredura (MEV) com uma ampliação de 2 mil vezes: (a) resíduo de beneficiamento de granito; (b) cimento; (c) sílica.	29
Figura 2-6-Curva Granulométrica do agregado miúdo.	29
Figura 2-7-Análise do tempo de pega do CPR por meio de propagação de pulsos ultrassônicos.	30
Figura 2-8-Evolução da resistência à compressão do CPR.	31
Figura 2-9-Evolução do módulo de elasticidade do CPR ao longo da idade.	32
Figura 3-1-Relação entre a resistência à compressão e a porosidade dos materiais sólidos – cimentos submetidos a cura em condições normais e cura em autoclave e agregados. ...	39
Figura 3-2-Tipos de brita utilizados conforme formato do grão: (a) Brita 0 VSI; (b) Brita 0 convencional.....	40
Figura 3-3-Etapas de produção e ensaio de compressão axial dos pavers: (a) moldagem; (b) cura; (c) capeamento; (d) ensaio de compressão.....	43
Figura 3-4-Permeâmetro de carga variável utilizado no ensaio de permeabilidade do concreto.	44
Figura 3-5-Execução do ensaio de permeabilidade: (a) corpo de prova encamisado; (b)permeâmetro montado; (c) execução.....	45
Figura 3-6-Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	47

Figura 3-7-Evolução da resistência à compressão do CPR.	47
Figura 3-8-Evolução da resistência à compressão dos pavers com o tempo de cura.	48
Figura 3-9-Comparativo entre a permeabilidade e a porosidade dos traços.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1- Padrões para permeabilidade de solos.	4
Tabela 2-1 - Traço e consumo de materiais utilizado para produção de concreto de pós reativos. Adaptado de Vanderlei (2004).	25
Tabela 2-2 - Dados de Caracterização do Cimento CP-V ARI	27
Tabela 2-3 - Resultados da Espectroscopia de Raio-X.	28
Tabela 2-4- Custo de produção do CPR.	32
Tabela 3-1 - Traço e consumo de materiais utilizados para produção de concreto de pós reativos. Adaptado de Vanderlei (2004).	41
Tabela 3-2 - Planejamento experimental.	42
Tabela 3-3 - Caracterização do agregado graúdo.	46
Tabela 3-4- Custo de produção do concreto permeável proposto, por traço.	51

RESUMO

FERNANDES, Wellington Emílio Hilarino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Concreto permeável para aplicação em pavimentação intertravada a partir de concreto de pós reativos – CPR**. Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti. Coorientadora: Rita de Cássia Sant’Ana Alvarenga.

Pavimentos permeáveis de concreto podem ser uma das alternativas para amenizar problemas relacionados ao escoamento superficial das águas de chuvas, diminuindo a velocidade do escoamento e permitindo a infiltração por meio de sua estrutura. Porém, um dos problemas presentes em concretos permeáveis está relacionado à sua resistência à compressão, que por vezes é baixa, devido a sua estrutura porosa, que permite a sua permeabilidade, e a fraca ligação entre os grãos que compõem o concreto. Em contrapartida, o Concreto de Pós Reativos (CPR) é um concreto de alto desempenho, com adição de sílica ativa e baixa relação água/cimento, conseguindo atingir resistência à compressão muito elevada, podendo, em certos casos, atingir 800 MPa. Além da elevada resistência, o CPR se destaca devido a sua aderência a outros materiais. Portanto, ao se produzir um concreto permeável através do CPR, pode-se obter peças que satisfazem as exigências normativas de resistência e permeabilidade. Este trabalho surgiu da necessidade de criar um produto que atendesse aos requisitos de permeabilidade e resistência mecânica da NBR 16416:2015. Este trabalho consistiu na fabricação de um concreto permeável com aplicação de CPR, afim de que o CPR garantisse uma boa aderência ao agregado e ao mesmo tempo agregasse resistência ao concreto permeável. Foram avaliados oito traços diferentes de concreto permeável, utilizando dois tipos de agregado graúdo e um mesmo traço de CPR. Foi possível obter resultados de resistência à compressão variando entre 18,21 MPa e 38,19 MPa, bem como uma elevada permeabilidade, variando de $1,7 \times 10^{-3} \text{m/s}$ até $7,8 \times 10^{-3} \text{m/s}$, afirmando o potencial que há na aplicação do CPR pra a produção de concreto permeável. Os resultados foram submetidos a análise estatística (ANOVA e Teste de Tukey), e todos atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 16416:2015 (ABNT, 2015)

ABSTRACT

FERNANDES, Wellington Emílio Hilarino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Permeable concrete for application to interlocked paving from concrete of reactive powders - RPC**. Adviser: Leonardo Gonçalves Pedroti. Co-adviser: Rita de Cássia Sant'Ana Alvarenga.

Pervious concrete pavements can be an alternative to mitigate problems related to the surface runoff of rainwater, reducing the flow velocity and allowing infiltration through its structure. However, one of the problems present in permeable concrete is related to its compressive strength, which is sometimes low, due to its porous structure, which allows its permeability, and the weak bond between the grains that make up the concrete. In contrast, Post-Reactive Concrete (CPR) is a high performance concrete with addition of active silica and low water / cement ratio, achieving very high compressive strength and in some cases reaching 800 MPa. In addition to high strength, CPR stands out due to its adherence to other materials. Therefore, when producing a permeable concrete through CPR, it is possible to obtain parts that meet the normative requirements of resistance and permeability. This work arose from the need to create a product that meets the permeability and mechanical strength requirements of NBR 16416:2015. This work consisted in the manufacture of a permeable concrete with CPR application, in order that the CPR ensure a good adhesion to the aggregate and at the same time added resistance to the permeable concrete. Eight different traces of pervious concrete were evaluated, using two types of large aggregate and the same CPR trait. It was possible to obtain compressive strength results ranging from 18.21 MPa to 38.19 MPa, as well as a high permeability, ranging from 1.7×10^{-3} m / s to 7.8×10^{-3} m / s, potential in the application of CPR to the production of permeable concrete. The results were submitted to statistical analysis (ANOVA and Tukey's test), and all meet the requirements established by NBR 16416:2015 (ABNT, 2015).

INTRODUÇÃO GERAL

1. Considerações Iniciais

Concretos permeáveis têm sido cada vez mais incentivados devido aos seus aspectos ambientais, particularmente favoráveis aos meios urbanos. Segundo a United State Environmental Protection Agency's (EPA), o concreto permeável é definido como a melhor prática de gestão para o controle de águas pluviais. Ele traz benefícios tanto para o solo, pois propicia a sua transpiração natural, para as bacias hidrográficas, pois permite o seu reabastecimento, e para os condutores de veículos, pois a drenagem evita a formação de poças, diminuindo o efeito de brilho e aquaplanagem nas pistas (BONICELLI, ARGUELLES & PUMAREJO, 2016).

Porém, ainda há uma grande demanda de padrões de fabricação e construção desses concretos. Alguns trabalhos, em âmbito nacional e internacional, foram publicados para avaliar as suas propriedades *in loco* e em laboratório. As aplicações principais ainda estão limitadas a áreas de pequeno ou pouco tráfego, já que esse tipo de concreto ainda apresenta problemas de durabilidade e resistência (BONICELLI, ARGUELLES & PUMAREJO, 2016; LAMB, 2014).

Um dos grandes problemas em se produzir esse tipo de material é a sua resistência, que fica fortemente afetada devido à grande estrutura de vazios que se faz necessária para provocar sua elevada permeabilidade, com um índice de vazios variando entre 15% e 30%, segundo Henderson et al. (2009). Uma porosidade inferior seria capaz de comprometer as suas propriedades hidráulicas, afirmam Montes e Haselbach (2006).

Por outro lado, outro tipo de concreto vem sendo estudado desde os anos 90 para suprir as necessidades de pré-fabricados e construções que exigem alto desempenho. Trata-se do Concreto de Pós Reativos (CPR), um concreto de ultra alto desempenho (CUAD) que tem a capacidade de atingir entre 200 e 800 MPa (VANDERLEI, 2004). O CPR possui como característica a baixa quantidade de defeitos e poros, o que faz com que sua resistência seja muito elevada (RICHARD, 1996). No estado fresco, tem como característica o fato de ser auto adensável, conseguindo preencher por completo os volumes onde é aplicado, o que confere boa aderência a outros materiais (MOURA, 2009).

Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre a resistência e a permeabilidade de diferentes traços de concreto permeável produzidos a partir do CPR com a adição de agregado graúdo. A inserção do agregado graúdo tem o intuito de provocar aumentar a permeabilidade do CPR, criando uma estrutura de vazios no concreto, ao mesmo tempo que o CPR une os grãos do agregado graúdo, devido a sua boa aderência às superfícies, conferindo, assim, uma maior estabilidade que a pasta de cimento iria conferir ao concreto.

2. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho foi desenvolver um concreto permeável, utilizando CPR com inserção de agregado graúdo, para aplicação em pavimentos por meio de peças de concreto, que atendam a requisitos mínimos de permeabilidade e resistência mecânica pré-estabelecidos por normas.

Como objetivo secundário, foi realizada uma análise crítica da NBR 16416:2015-Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015) frente aos resultados encontrados, considerando-se os requisitos por ela estabelecida para esse tipo de concreto.

3. Justificativa

O presente trabalho se justifica na necessidade de se pesquisar alternativas eficientes para redução do acúmulo de água na superfície que dos pavimentos, em conjunto com os sistemas de escoamento eficientes. A aplicação e pavimentos permeáveis que permitam a infiltração de água para o solo é uma das soluções que podem ser empregadas nesse sentido.

A necessidade de estudos acerca de traços e de materiais aplicados a concretos permeáveis para pavimentação se torna um desafio na busca por produtos que atendam à requisitos de normativos.

O emprego do CPR como material de ligação aplicado em concreto permeável para pavimento o torna uma inovação, carente de avaliação, considerando que sua aplicação vem sendo estudada em usos em estruturas de concreto e como material de reparo.

4. Estrutura da Dissertação

Este trabalho está estruturado em cinco partes. Além da Introdução Geral, é composto por três capítulos, sendo o primeiro uma revisão Bibliográfica, o segundo intitulado Produção de CPR com Adição de Resíduo de Beneficiamento de Granito e o terceiro intitulado de Avaliação de Concreto Permeável Produzido a Partir de Concreto de Pós Reativos, e ainda pela Conclusão Geral. Integram ainda esse trabalho os anexos, com resultados individuais dos estudos realizados.

Na, Introdução Geral, é contextualizado o sistema de pavimentação em concreto permeável, como sua aplicação, vantagens e limitações, bem como a apresentação do concreto de pós reativos. Além disso, expõem-se os objetivos e a forma como este trabalho pode vir a contribuir para problemas da sociedade, no âmbito da engenharia civil.

O capítulo 1, Revisão Bibliográfica, traz os temas de interesse para ao entendimento deste trabalho.

O capítulo 2, Produção de CPR com Adição de Resíduo de Beneficiamento de Granito, trata da fabricação do CPR destinado a compor o concreto permeável desenvolvido na pesquisa, bem como os ensaios de caracterização aplicados a ele.

No capítulo 3, Avaliação de Concreto Permeável Produzido a Partir de Concreto de Pós Reativos, é exposto como se deu a fabricação do concreto permeável, principal objeto de estudo desse trabalho, bem como os resultados de resistência à compressão e permeabilidade.

Por fim, nas Conclusões Gerais, são apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos, visando atender aos objetivos especificados, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Pavimento Permeável

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 16416:2015– Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015), define concreto permeável como sendo aquele que possui em sua estrutura vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade.

Nos Estados Unidos, a ASTM C1701 / C1701M-09 (ASTM,2009), que trata dos ensaios em pavimentos permeáveis, estabelece os procedimentos a serem seguidos para determinação da permeabilidade e resistência à compressão, mas, no entanto, não estabelece nenhum requisito para classificação dos resultados. Trabalhos realizados com base nessa norma classificam a permeabilidade do concreto poroso da mesma forma que Tezaghi e Peck (1967) fazem para a avaliação da permeabilidade dos solos, conforme Tabela 1-1.

Tabela 1-1-Padrões para permeabilidade de solos.

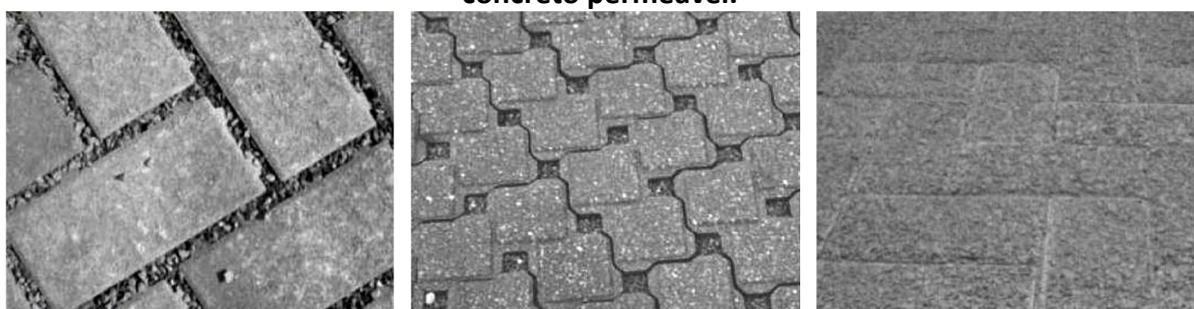
Tipo de solo	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)	Grau de permeabilidade
Brita	$>10^{-3}$	Alta
Areia de brita, areia fina, areia limpa	$>10^{-3}$ a 10^{-5}	Média
Areia, areia suja, silte arenoso	$>10^{-5}$ a 10^{-7}	Baixa
Silte, silte argiloso	$>10^{-7}$ a 10^{-9}	Muito baixa
Argila	$<10^{-9}$	Praticamente impermeável

Fonte: Adaptado de Terzaghi e Peck (1967).

A NBR 16416:2015 (ABNT, 2015) adota critérios semelhantes aos da ASTM C1701 / C1701M-09 (ASTM, 2009) para a execução do ensaio de permeabilidade em campo. O método proposto pela ABNT NBR 16416:2015 utiliza-se de um permeômetro de carga variável simplificado dotado de um anel de infiltração, podendo ser aplicada para a avaliação prévia do coeficiente de permeabilidade em todos os tipos de pavimento permeável, em campo. Já o método laboratorial indicado pela ABNT NBR 16416:2015, é por meio do permeômetro de carga constante, mencionado na NBR 13292 (ABNT, 1995), utilizado apenas para concretos. Além disso, adota a classificação de permeabilidade de solos, estabelecidos por Terzaghi e Peck (1967) como critério de classificação do grau de permeabilidade no pavimento permeável.

A NBR 16416:2015 (ABNT, 2015) adota ainda requisitos de resistência à compressão do concreto utilizado para o revestimento da pavimentação, baseando-se na ABNT NBR 9781:2013 (ABNT, 2013). Assim, estabelece que o pavimento permeável de peças de concreto convencional, quando instalado com juntas alargadas ou possuírem áreas vazadas (Figura 1-1a e Figura 1-1b), devem apresentar, no mínimo, 35,0 MPa de resistência à compressão para tráfegos de pedestres e veículos leves; no caso de utilização de peças de concreto permeável (concreto poroso, Figura 1-1c), devem possuir 20,0 MPa, na mesma situação de tráfego.

Figura 1-1-Formas de pavimento permeável: (a) juntas alargadas; (b) áreas vazadas; (c) concreto permeável.



(a)

(b)

(c)

Fonte: NBR16416:2015 (ABNT, 2015).

Além do pavimento intertravado, o pavimento permeável pode ser constituído por placas de concreto e pelo concreto moldado no local, conforme é demonstrado na Figura 1-2a e Figura 1-2b.

Figura 1-2 - (a) Pavimento executado por meio de placas de concreto permeável; (b) Pavimento executado por meio de concreto permeável moldado in loco.



(a)

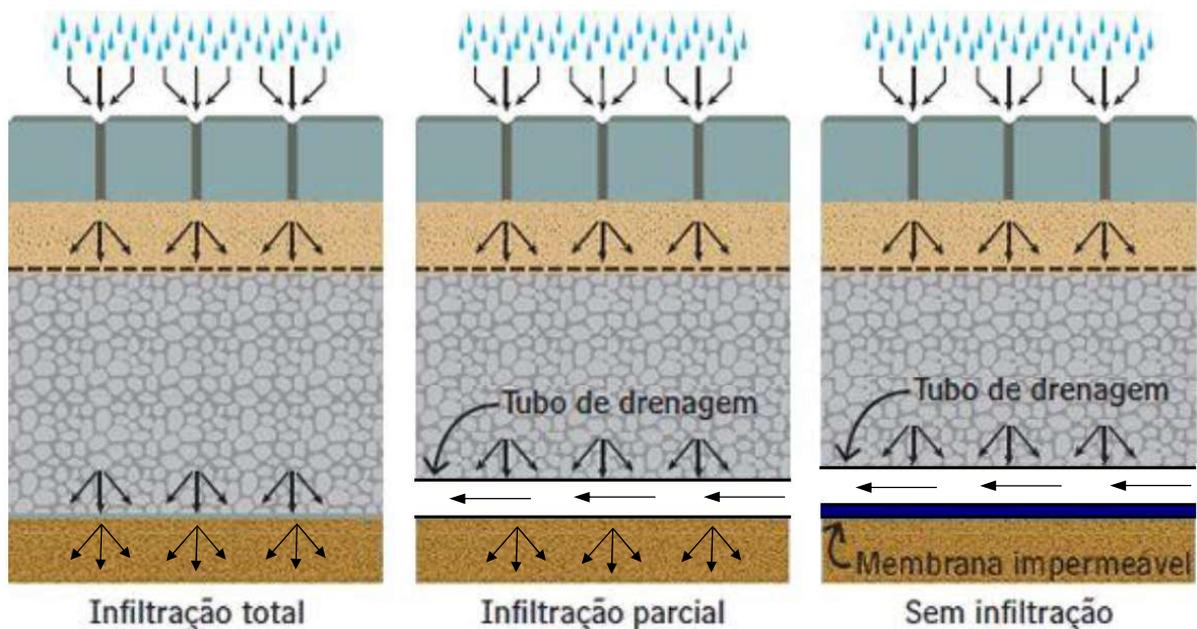
(b)

Fonte: (a) Silva, 2012; (b) Marchioni e Silva, 2011.

O pavimento permeável é composto de camadas, sendo o revestimento a última camada a ser aplicada. Abaixo dele, há a camada de assentamento que é precedida pela base permeável. É indicada a instalação de uma manta geotêxtil antes da camada de subleito, que é a última camada do pavimento. Conforme sistema de infiltração, definido pela NBR 16416:2015 (ABNT 2015), ainda podem ser adicionados um tubo drenante e uma membrana impermeável. O sistema de infiltração, demonstrado na Figura 1-3, é classificado em três tipos:

- Infiltração total: onde toda a água infiltrada é direcionada ao subleito;
- Infiltração parcial: que apresenta uma tubulação de drenagem que coleta parte da água infiltrada, enquanto outra parte segue para o subleito para complementar a infiltração;
- Sem infiltração: onde toda água infiltrada é coletada pelo tubo drenante e impedida de passar para o subleito com o auxílio de uma membrana impermeável.

Figura 1-3 - Sistemas de infiltração de pavimento permeável.



(Fonte: Adaptado de Silva, 2012).

2. Agregado Graúdo

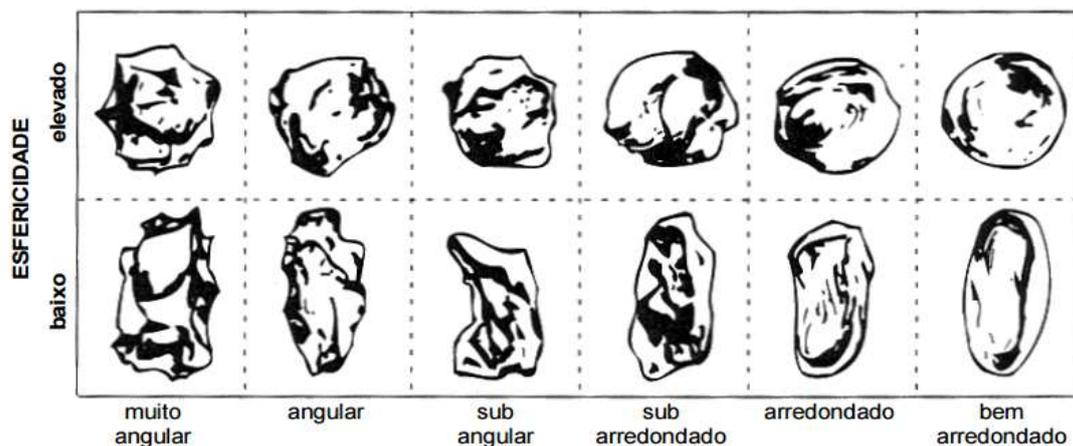
Tratando-se de concreto permeável, alguns cuidados devem ser tomados para obter resultados mais satisfatórios em relação à resistência à compressão e à permeabilidade.

Mehta e Monteiro (2008) recomendam, para concreto convencional, que se evite a utilização de agregados de formas lamelares ou alongadas em concretos. Geralmente, ocorre falta de contato entre os grãos com esses formatos, sendo necessário o preenchimento do espaço resultante com argamassa. Para St. John et al. (1998), partículas de elevada esfericidade e angulosas são mais desejáveis para fabricação de concretos, enquanto as mais alongadas ou lamelares devem ser evitadas.

Sempre que possível, segundo Mehta e Monteiro (2008), deve-se limitar esse material a 15% do agregado graúdo. Por outro lado, agregados com forma mais arredondada formam partículas que apresentam maior atrito entre si. Em um concreto permeável, um formato mais lamelar também se torna indesejável, tendo em vista que, com a supressão ou redução do agregado miúdo, se faz importante o atrito entre o agregado graúdo, de forma a aumentar a resistência do concreto. Além disso, formas mais alongadas e lamelares afetam consideravelmente a trabalhabilidade do concreto.

Rochas sedimentares estão propícias a gerar agregados mais lamelares, enquanto rochas de origem granítica estão mais dispostas a gerarem agregados com arestas mais bem definidas, ou mesmo quase arredondadas. Na Figura 1-4, são apresentadas as possíveis formas que o agregado pode ter.

Figura 1-4-Possíveis formas dos grãos de agregados.

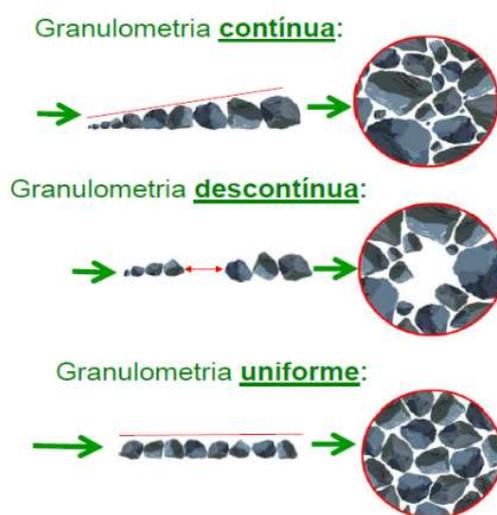


Fonte: St. John et al. (1998).

Além da natureza do agregado graúdo, o procedimento de britagem pode interferir na forma do grão. Diferentes tipos de britadores podem ser empregados na produção de agregados graúdos. Enquanto britadores do tipo de mandíbulas geram grãos com formatos mais lamelares, os britadores de impacto geram grãos com formatos cúbicos ou arredondados.

Conforme publicação do IBRACON (2007), além da forma, a distribuição granulométrica é outra característica do agregado que tem grande impacto na estrutura do concreto. Concretos produzidos com agregados de granulometria contínua apresentam melhor trabalhabilidade e um menor índice de vazios. Por outro lado, uma graduação descontínua apresenta mais vazios entre os grãos, devido à falta de material que venha a preenchê-los. Agregados de graduação uniforme apresentam maior contato entre si e permitem que haja pequenos espaços entre os grãos. Na Figura 1-5, é apresentado como a granulometria dos agregados influencia na formação de vazios.

Figura 1-5-Classificação da composição granulométrica dos agregados.



Fonte: IBRACON (2007).

3. Concreto Permeável

O concreto permeável, também conhecido como concreto poroso, é caracterizado por ser uma variedade de concreto com volume de poros interligados entre si. Conforme o boletim ACI 522-R10 (ACI, 2010), o concreto permeável foi utilizado pela primeira vez em 1852, na Europa, na construção de duas casas a partir de cimento, brita e água. Contudo, foi patentado somente em 1980, nos Estados Unidos (GRUBEŠA et al., 2018).

Ainda na Europa, até então, sua utilização era aplicada à construção de edificações, associado mais à redução de peso e custo das estruturas que à sua permeabilidade (HÖLTZ, 2011). Além da leveza, as propriedades de isolamento térmico e acústico eram atrativas no seu emprego em edificações residenciais. Assim, era aplicado em construções de até dois andares, até a

eclosão da Segunda Guerra Mundial. Após o término da segunda guerra, passou a ser aplicado em construções de até 10 pavimentos (FRANCIS, 1965).

Li (2009) destaca que mesmo sendo uma tecnologia antiga, remontando há mais de 160 anos, a utilização do concreto permeável sofreu um grande avanço apenas a partir da década de 1970, nos Estados Unidos, com a aplicação em estacionamentos e algumas avenidas. Diferentemente da Europa, sua aplicação nos Estados Unidos se dava devido às suas características de permeabilidade, no intuito de mitigar os efeitos, cada vez mais recorrentes, de inundações (Ghafoori,1995)

Os estudos acerca da utilização de concreto permeável aplicado à pavimentação vêm se desenvolvendo de forma gradual, com aplicação de alguns projetos. Polastre e Santos (2006) citam como exemplos o Parque Tecnológico de Belo Horizonte-MG, que tem sua pavimentação executada em concreto permeável, minimizando o risco de inundações no recinto e ainda alimenta as nascentes do parque. Citam ainda o caso da Prefeitura de São Paulo, também em 2006, que em parceria com a empresa Casa Cor utilizaram a aplicação do concreto permeável na recuperação de áreas degradadas com o intuito de auxiliar a manutenção de aquíferos subterrâneos.

Dentre as diversas características do concreto permeável, a sua resistência à compressão e a permeabilidade são as mais estudadas. O coeficiente de permeabilidade, também chamado de condutividade hidráulica ou taxa de percolação, representa uma das mais relevantes características do concreto permeável (BATEZINI, 2013). Tennis et al. (2004) a definem como o índice de infiltração da água através da estrutura permeável do concreto.

Schaefer et al. (2006) encontraram coeficientes de permeabilidade variando entre $0,1 \times 10^{-3}$ m/se a $1,5 \times 10^{-3}$ m/s. Tavares e Kazmierczak (2016), analisando diversos traços de concreto permeável, obtiveram resultados da ordem de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s. Montes e Haselbach (2006) obtiveram permeabilidade variando de $0,14 \times 10^{-3}$ m/s à $11,9 \times 10^{-3}$ m/s. Li et al. (2017) encontraram resultados na ordem de $0,1 \times 10^{-3}$ m/s e $0,2 \times 10^{-3}$ m/s, enquanto Batezini e Balbo (2015) alcançaram permeabilidade variando de 5×10^{-3} m/s a 7×10^{-3} m/s.

Contudo, o uso do concreto permeável em revestimento de pavimentos depende do seu comportamento estrutural, regido pela sua resistência mecânica, que, por sua vez, é afetada pelo índice de vazios da mistura (LI, 2009), refletindo assim em sua permeabilidade.

Goed (2009), em sua pesquisa, obteve resultados de resistência à compressão próximos a 10 MPa e índice de vazios entre 26% e 28%. Batezini (2013) obteve resistência à compressão variando entre 6 e 10 MPa e um índice de vazios de 25%. Tavares e Kazmierczak (2016) alcançaram resultados na faixa de 9,3 a 22,1MPa. Alves (2016) obteve resultados entre 9,1 e 16,6 MPa.

4. Concreto de Pós Reativos – CPR

Segundo Biz (2001), o concreto de pós reativos (CPR) foi desenvolvido por Richard e Cheyrezy (1995), a partir do High Performance Concrete (HPC) que é um dos materiais desenvolvidos mais recentemente, baseado no uso do cimento Portland. É também conhecido como concreto de ultra alto desempenho (CUAD).

O CPR é composto basicamente por cimento, agregado miúdo, sílica ativa, pó ultrafino, aditivos de alta eficiência e água, podendo ou não ter adição de fibras de pequenas dimensões. A relação água/cimento (a/c) utilizada é muito reduzida, situando-se entre 0,15 e 0,20 (GUSMÃO, 2017).

O CPR foi concebido como uma alternativa ao aço e ao concreto de alto desempenho, este último apresentando resistência à compressão da ordem de 60 MPa a 120 MPa (VANDERLEI, 2004), podendo superar os 800 MPa. Foi projetado para atender às exigências de estruturas pré-moldadas submetidas a ambientes agressivos, e devido ao seu ótimo desempenho passou a ser aplicado também para usos militares (BIZ, 2001).

Para Richard e Cheyrezy (1995), o princípio básico do CPR consiste em ser um concreto com o mínimo de defeitos possíveis. Esses defeitos podem ser descritos como microfissuras, ou poros, que tendem a afetar a capacidade da estrutura de suportar maiores tensões.

A primeira aplicação registrada do CPR se deu na construção da passarela de Sherbrooke - Canadá, projetada pela empresa Le Groupe Teknika, apresentada na Figura 1-6. Trata-se de uma estrutura composta por uma viga inferior sem armaduras passivas, com 96 cm de largura

e 38 cm de altura, onde estão conectados tubos de aço, preenchidos com CPR, que suportam uma casca de 3 cm de espessura por 3,30 m de largura (CHRIST, 2011).

Figura 1-6- Aspecto construtivo da passarela de Sherbrook, Canadá.



Fonte: Christ, 2011.

Além da elevada resistência, o CPR se destaca pelo seu desempenho quanto à aderência. Lee et al. (2007) avaliaram o uso do concreto de pós reativos como material de reparo, buscando analisar a durabilidade e a qualidade da aderência ao concreto existente. As amostras foram avaliadas quanto as suas características mecânicas através de ensaios destrutivos e os resultados obtidos demonstraram que o CPR apresenta um grande potencial para ser utilizado como material de reparo. Tayeh et al. (2015) chegaram às mesmas conclusões, quando avaliaram a qualidade da aderência do concreto de pós reativos ao substrato de concreto convencional.

5. Tempo de Pega

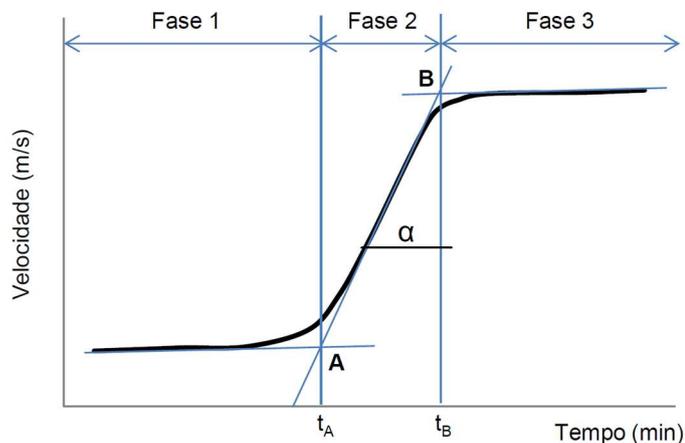
O CPR, devido à sua constituição de pós e ao emprego do cimento CP-V em sua fabricação apresenta grande reatividade em sua mistura, o chama atenção ao seu tempo de pega. Segundo Neville (1997), pega é o termo empregado para definir o processo de solidificação da pasta de cimento (passagem de seu estado líquido para o estado sólido). Ocorre devido às reações de hidratação do cimento e materiais pozolânicos. O início de pega se dá a partir do momento em que a pasta se torna não mais trabalhável, enquanto o fim se dá com a total solidificação da pasta. Durante esse período são intensas as reações de hidratação, o que

acarreta um aumento na temperatura da mistura, ao mesmo tempo que a temperatura pode afetar a duração desse período. Estudos para monitoramento do tempo de pega por meio de pulsos ultrassônicos foram realizados por Reinhardt et al (2004) sendo posteriormente aprimorados por Lee et al (2004).

Segundo Lee et al. (2004) a propagação de ondas evidencia três fases no processo de endurecimento do concreto, sendo a fase inicial (fase 1) correspondente pelo período desde que a mistura é depositada no molde até o início de pega, caracterizando-se pela propagação das ondas em um meio viscoso fluido, onde ocorre o início das reações de hidratação do cimento. A fase 2 se dá a partir do momento em que as reações de hidratação ocorrem com mais intensidade, marcado por uma acentuada elevação na velocidade do pulso ultrassônico em um curto intervalo de tempo, até atingir valores próximos ao máximo, evidenciando uma transição de um meio fluido para um meio sólido. A fase 3 é marcada pela redução da atividade de hidratação do cimento e conseqüente diminuição da elevação de velocidade do pulso ultrassônico marcando assim o fim de pega da mistura.

Conforme pode-se observar na Figura 1-7, a fase 1 corresponde do início de moldagem até o tempo T_A , que marca o início da pega, a fase 2 compreendendo o intervalo entre o tempo T_A e T_B , onde termina o fim da pega, e a fase 3, após o tempo T_B , partindo do fim de pega até o completo endurecimento da mistura.

Figura 1-7- Avaliação do tempo de pega por meio de propagação de pulsos ultrassônicos.



Fonte: Lee et al., 2004.

6. Resíduo de Beneficiamento de Granito

O resíduo de beneficiamento de granito é obtido durante diversas etapas do processo de beneficiamento de rochas ornamentais de origem granítica (granitos, gabros e gnaisses), como as etapas de serragem dos blocos de rochas e polimento das chapas. Durante esse processo industrial, as partículas finas do granito e a água se misturam e formam uma lama (SINGH et al., 2016a).

A lama proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais é, na maioria das vezes, disposta em aterros com elevados custos e impacto ambiental negativo, o que afeta o desenvolvimento econômico e ambiental de tais produções industriais, bem como a saúde pública (LI et al., 2013). Isso porque a deposição de grandes quantidades dessa lama pode causar sérios danos à flora e à fauna local. Além disso, após a secagem, partículas finas, ricas em sílica, podem ser inaladas, causando sérios problemas respiratórios aos seres humanos (TORRES et al., 2004). Diante deste contexto, este setor industrial é forçado a encontrar alternativas para reutilização desse resíduo.

Segundo Torres et al. (2004) e Vijayalakshmi, Sekar e Ganesh Prabhu (2013), nas diferentes etapas do beneficiamento das rochas graníticas, a quantidade de resíduo gerada atinge cerca de 20 a 25% da produção global, o que significa milhares de toneladas de resíduos por ano, só no Brasil. Isso implica em uma grande preocupação com o resíduo gerado nesse setor industrial, pois a quantidade é extremamente significativa e, quando eliminado inadequadamente, pode causar sérios problemas ao meio ambiente e à saúde humana (MASHALY et al., 2016; MENDONÇA et al., 2014).

O Brasil se destaca no grupo dos grandes produtores e exportadores mundiais do setor de rochas ornamentais. Dentre os estados brasileiros, o Espírito Santo evidencia-se como o principal polo minerador e de beneficiamento de rochas ornamentais, com destaque para o granito (SARDOU FILHO et al., 2013; ABIROCHAS, 2017).

O setor da construção civil, por sua vez, consome um volume enorme de recursos naturais, tornando-se uma opção para o reaproveitamento de rejeitos (BLANKENDAAL, SCHUUR e VOORDIJK, 2014).

Muitos trabalhos sobre o aproveitamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais graníticas em materiais de construção já foram desenvolvidos. Dentre eles, pode-se destacar a produção de cimentos (LI et al., 2013; MEDINA et al., 2017), materiais cerâmicos (TORRES et al., 2009; HOJAMBERDIEV, EMINOV e XU, 2011; ACCHAR, AVELINO e SEGADÃES, 2016), concretos (ELMOATY, 2013; VIJAYALAKSHMI, SEKAR e GANESH PRABHU, 2013; SINGH, et al., 2016b; SHARMA et al., 2017) e argamassas (MÁRMOL et al., 2010; RAMOS et al., 2013). Os resultados obtidos na maioria desses estudos foram satisfatórios no que se refere ao desempenho dos materiais de construção produzidos com adições do resíduo. Entretanto, para Vijayalakshmi, Sekar e Ganesh Prabhu (2013), a quantidade de resíduo reutilizado ainda é insignificante, o que torna necessária sua aplicação em outros projetos.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio – Rio de Janeiro, 2013.

_____. ABNT NBR 13292:1995 – Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio – Rio de Janeiro, 1995.

_____. ABNT NBR 16416:2015 Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos – Rio de Janeiro, 2015.

ABIROCHAS. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no 1º Semestre de 2017. Disponível em <http://www.abirochas.com.br/noticia.php?eve_id=4195>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

ACCHAR, W.; AVELINO, K. A.; SEGADÃES, A. M. Granite waste and coffee husk ash synergistic effect on clay-based ceramics. *Advances in Applied Ceramics*, 115, p. 236-242, 2016.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 522. ACI 522R-10: Pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 40p. 2010.

ALVES, P. B. Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 90p. 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C1701 / C1701M-09, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009

BATEZINI, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação (Mestrado em Engenharia de transportes-Infraestrutura de transportes. Escola politécnica da Universidade de São Paulo - SP, 2013.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V8, N3. P. 248-259. 2015.

BIZ, C. E. Concreto de Pós Reativos. 2001, 101 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. Journal of Cleaner Production, 66, p. 27-36, 2014

BONICELLI, A.; ARGUELLERS, G. M.; PUMAREJO, L. G. F. Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. Procedia Engineering. Volume 161, p. 1568-1573, 2016
CHRIST, R. Contribuição ao Estudo do Concreto de Pós Reativos. 2011, 93 p. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Rio Grande do Sul.

ELMOATY, A. E. M. A. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. Construction and Building Materials, 47, p. 743-752, 2013.

FRANCIS, A.M. Early Concrete Buildings in Britain. Concrete and Constructional Engineering. Londres, v.60, n. 2, p. 73-75. Fev. 1965.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory Investigation of Compacted No-fines Concrete for Paving Materials. Journal of Materials in Civil Engineering, V.7, No. 3, p. 183-191, 1995.

GOEDE, W. G. Pervious Concrete: Investigation into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods. Thesis (Master in Engineering) – Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Washington DC, 198 p. 2009.

GRUBEŠA, I. N.; BARIŠIĆ, I.; DUCMAN, V.; KORAT, L. Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and Building Materials*. Volume 169, p. 252-260, March 2018.

GUSMÃO, A. C. Utilização do concreto de pós reativos como material de reparo - Ênfase na resistência de aderência. 2017, 166 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2017.

HAMMER, M.D. The Barma autogenous crushing mill – the new development in autogenous crushing and milling. *Proc. Aus IMM Annual Conference*, p. 207-215. 1990

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J. Pervious Concrete Pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. v. 2095, p. 13-21, Nov. 2009

HOJAMBERDIEV, M.; EMINOV, A.; XU, Y. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. *Ceramics International*, 37, p. 871-876, 2011.

HOLTZ, F. C. Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 138p. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. IBRACON, 2007. Editor Geraldo Cechella Isaia. 2007.

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

LEE, H. K., LEE, K. M., KIM, Y.H., BAE, D. B., 2004, "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete", *Cement Concrete Research*, v. 34, pp. 631-640.

LEE, M. G. WANG, Y. CHIU, C.T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material: *Construction and Building Materials* n. 21, p.182–189, 2007

LI, J. Mix Design of Pervious Recycled Concrete. *GeoHunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements*. V. 195, n. 15, p. 103–108, Ago. 2009.

LI, J.; ZHANG, Y.; LIU, G.; PENG, X. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*. Volume 138, p. 479-485, Maio 2017.

LI, Y.; YU, H.; ZHENG, L.; WEN, J.; WU, C.; TAN, Y. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. *Construction and Building Materials*, 38, p. 1-7, 2013.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. Pavimento Intertravado Permeável – Melhores Práticas. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 24 p. 2011.

MÁRMOL I.; BALLESTER P.; CERRO S.; MONRÓS G.; MORALES J.; SÁNCHEZ L. Use of granite sludge wastes for the production of colored cement-based mortars. *Cement and Concrete Composites*, 32 (8), p. 617-622, 2010.

MASHALY, A. O.; EL-KALIOUBY, B. A.; SHALABY, B. N.; EL EGOHARY, A. M.; RASHWAN, M. A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, 112, p. 731-741, 2016.

MEDINA, G.; SAEZ DEL BOSQUE, I. F.; FRÍAS, M.; SANCHEZ DE ROJAS, M. I.; MEDINA, C. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*, 148, p. 467-476, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 674p., 2008.

MENDONÇA, J. M. F.; CAPITANO, C.; PERI, G.; JOSA, A.; RIERDEVALL, J.; GABARRELL, X. Environmental management of granite slag production from an industrial ecology standpoint. *Journal of Cleaner Production*, 84, p. 619-628, 2014.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. *Environmental Engineering Science* V. 23, p. 960-969, 2006.

MOURA, E. Ultrafinos. *Revista Técnica*, 2009. Disponível em: <[http:// techne.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo285469-1.aspx](http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo285469-1.aspx)>. Acesso em 22/11/2016.

NEVILLE, A. M., 1997, *Propriedades do concreto*, São Paulo: Editora PINI, 828 p.

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

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SCHMIDT, B.; RIO, J.; COUTINHO, J. S. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, p. 1001-1009, 2013.

REINHARDT, H. W.; GROSS, C.U.; 2004, "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete", *Construction and Building Materials*, v. 18, pp.145 -154.

RICHARD, P. CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. In: *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n. 07, oct, 1995, p.1501-1511.

RICHARD, P. Reactive powder concrete: A new ultra-high-strength cementitious material. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, Paris, France. *Anais...* Paris. p. 1343-1349, 1996.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. *Tratamento de minérios*. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT. Capítulo 4, páginas 113-194, 2004.

SARDOU FILHO, R.; MATOS, G. M. M.; MENDES, V. A.; IZA, E. R. H. F. *Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo*. Brasília, 2013.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Final Report, Civil Engineering, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2006.

SHARMA, N. K.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 151, p. 158-163, 2017.

SILVA, F. B. Pavimentos de concreto permeável. *Revista Técnica*, São Paulo, edição 190. Novembro, 2012. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/190/artigo288015-1.aspx>>. Acesso em: 20 Jan. 2018.

SILVEIRA, A.M. Um asfalto anti-enchente. *Jornal Zero Hora, Caderno Nosso Mundo Sustentável*, Porto Alegre. Ano 1, n 41, p. 1 e 4. 6 dez. 2010.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. *Journal of Cleaner Production*, 126, p. 74-87, 2016a.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. *Journal of Cleaner Production*, 127, p. 172-182, 2016b.

ST. JOHN, D.A.; POOLE, A.B.; SIMS, I. *Concrete Petrography – a Handbook of Investigative Techniques*. London, Arnold. 474p, 1998.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. V9, N1. P. 75-90. 2016.

TAYEH, B.A. ABU BAKAR, B.H. MEGAT JOHARI, M.A. Assessment of adhesion between RPC overlay and existing concrete substrate, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 802 (2015) pp 95-100.

TENNIS, P. D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. *Pervious concrete pavements*. EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 36p. 2004.

TERZAGHI, K. PECK, R. B. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley, New York, London, Sydney, 1967.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; AGATHOPOULOS, S.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA J. M. F. Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. Journal of the European Ceramic Society, 24, p. 3177-3185, 2004.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. Journal of the European Ceramic Society, 29, p. 23-30, 2009.

VANDERLEI R. D. Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. Construction and Building Materials, 46, p. 1-7, 2013.

Capítulo 2

PRODUÇÃO DE CPR COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE GRANITO

1. Introdução

A busca por materiais de base cimentícia que apresentem alto desempenho mecânico remonta à década de 1930, quando, de acordo com Richard e Cheyrezy (1995), Eugène Freyssinet aplicou pressão no concreto em estado fresco, na sua moldagem, com a intenção de melhorar sua resistência à compressão. Esses autores citam ainda que, na década de 1960, a aplicação de pressão juntamente com a cura térmica do concreto possibilitou a obtenção de resistência à compressão da ordem de 650 MPa.

Com base nessas experiências, o concreto de pós reativos (CPR) foi desenvolvido na década de 1990, por meio de pesquisas realizadas na França e no Canadá, como uma alternativa à utilização do aço e do concreto de alto desempenho que apresentava, este último, resistência da ordem de 60 MPa a 120 MPa (VANDERLEI, 2004), chegando a valores superiores a 800 MPa. Esse concreto foi projetado para atender às exigências de estruturas pré-moldadas submetidas a ambientes agressivos, e, devido ao seu ótimo desempenho, passou a ser aplicado também para usos militares (BIZ, 2001).

A primeira aplicação do CPR se deu na construção da passarela de Sherbrooke - Canadá, projetada pela empresa Le Groupe Teknika, apresentada na Figura 2-1. Trata-se de uma estrutura composta por uma viga inferior sem armaduras passivas, com 96 cm de largura e 38 cm de altura, onde estão conectados tubos de aço, preenchidos com CPR, que suportam uma casca de 3 cm de espessura por 3,30 m de largura (CHRIST, 2011).

Assim, o CPR vem se mostrando uma alternativa ao concreto convencional, trazendo vários benefícios como alta resistência e dureza. Além disso, pode contribuir para a redução de seção dos elementos estruturais e a redução no uso de armaduras, impactando diretamente o peso global da estrutura (HAN et al., 2017). Ainda, devido a sua composição, pode vir a aumentar a vida útil da edificação por apresentar uma estrutura mais uniforme que o concreto convencional e com menos porosidade.

Figura 2-1-Aspecto construtivo da passarela de Sherbrook, Canadá.



Fonte: Christ, 2011.

Constituído basicamente por pós (cimento, sílica e pó de quartzo), o CPR apresenta em sua composição agregados com dimensões máximas características entre 0,3mm e 0,6mm (BIZ, 2001). Vanderlei (2004) cita diâmetros de até 2,0mm. Collepardi et al. (1997) citam substituições parciais que alcançaram agregados com até 8,0mm de diâmetro máximo, sem perda significativa da resistência do CPR.

Por ser constituído de pós em elevada finura, o CPR, em seu estado fresco, apresenta-se como uma pasta altamente densa e que, após endurecida, forma um material que apresenta o mínimo de defeito em sua estrutura, como microfissuras ou poros, e com elevada compacidade (BIZ, 2001)

Para Isaia et al. (2011), a eliminação do agregado graúdo aumenta a homogeneidade e compacidade do concreto. Além disso, aumenta a superfície específica do esqueleto granular, distribuindo melhor as tensões aplicadas sobre a estrutura, elevando assim sua resistência à compressão. Segundo Vanderlei (2004), a eliminação do agregado graúdo na mistura suprime a zona de transição agregado-pasta e reduz a relação agregado-matriz, contribuindo para a formação de uma estrutura mais estável.

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo a produção e caracterização de um CPR fabricado com resíduo de beneficiamento de granito avaliando seu tempo de pega e sua resistência à compressão e flexão, bem como o módulo de elasticidade

Assim, optou-se por utilizar o resíduo do beneficiamento de granito, obtido na região de Cachoeiro do Itapemirim-ES, como substituto ao pó de quartzo.

2. Materiais e Métodos

Esta pesquisa consistiu na produção de CPR com a inserção de resíduo do beneficiamento de granito em substituição ao pó de quartzo. O resíduo é oriundo da cidade de Cachoeiro do Itapemirim-ES, polo nacional do beneficiamento de rochas ornamentais, e fornecido pela empresa Decolores Mármore e Granitos. Apresenta-se na forma de um pó branco, após sua secagem. Foi coletado aproximadamente 300kg de resíduo, e preparados para em ensaios em laboratório seguindo procedimentos da NBR NM 26:2009 (ABNT, 2009).

De modo geral, o resíduo em questão é um subproduto dos processos de corte dos blocos de rochas e polimento das chapas. Durante esses processos, as partículas finas do granito e a água se misturam, formando uma lama. Mais especificamente, o resíduo de granito aqui utilizado foi obtido através do processo de corte por fio diamantado, após ser submetido ao tratamento de perda de umidade no equipamento denominado filtro prensa (SINGH et al., 2016).

Foram determinadas a massa específica e a área específica conforme NBR 16605:2017 (ABNT, 2017) e NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente.

Foi utilizado um cimento do tipo CP V ARI. A amostra foi caracterizada quanto a massa específica (NBR 16605:2017, ABNT, 2017), à área específica (NBR 164372:2017, ABNT, 2017), à finura (NBR 11579:2012), à pasta de consistência normal (NBR 16606:2017, ABNT, 2017), ao tempo de pega (NBR 16607:2017, ABNT, 2017) e à expansibilidade (NBR 11582:2016)

Foi empregada uma sílica ativa, de origem metalúrgica, que teve determinadas sua massa específica e área específica conforme especificação das normas NBR16605:2017 (ABNT, 2017) e NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente.

As granulometrias do resíduo de beneficiamento de granito, do cimento e da sílica foram determinadas por meio de analisador de dimensão de partículas à laser Bettersize 2000. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto.

Além da granulometria, foi realizada a determinação da composição química, com a identificação de óxidos presentes nas amostras, por meio de análise de espectroscopia de raio-x (EDS), utilizando-se um microscópio marca Jeol, modelo JSM- 6010LA, dotado de sonda Espectrográfica de Dispersão de Energias (EDS), do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa.

Ainda foram obtidas as imagens por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizado o equipamento Leo 1430VP, do Núcleo de Microscopia e Microanálise do Centro de Ciências Biológicas e Saúde da Universidade Federal de Viçosa, utilizando uma ampliação de duas mil vezes.

O agregado miúdo (areia) utilizado é de origem artificial, produzido na cidade de São Geraldo-MG, originado da britagem e moagem de rocha granítica e separado por processo de peneiramento. As amostras de ensaios foram preparadas conforme a NBR NM 26:2009 (ABNT, 2009). Foram determinadas amassa específica e a absorção, conforme ASTM C128-15 (ASTM, 2015). Sua dimensão máxima característica, módulo de finura correspondente e granulometria foram determinadas segundo os procedimentos da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). O teor de material pulverulento, determinado segundo a NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003), foi desconsiderado, pois, após o peneiramento, todo material coletado foi lavado sobre a peneira de malha de 0,075mm para eliminação de material fino.

Além dos materiais já citados, ainda foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração, composto por policarboxilatos, de densidade de igual a $1,080\text{g/cm}^3$, e água tratada para a produção do CPR.

A dosagem do CPR foi realizada com o intuito de se obter um produto com alta densidade, onde os espaços vazios entre as partículas são preenchidos por partículas ainda menores, de forma sucessiva. É demonstrado na Tabela 2-1 o traço utilizado, bem como o consumo dos materiais constituintes.

Tabela 2-1 - Traço e consumo de materiais utilizado para produção de concreto de pós reativos. Adaptado de Vanderlei (2004).

Material	Relação em massa	Consumo (kg/m³)
Cimento	1,000	874
Areia	1,101	962
Resíduo de Granito	0,235	205
Sílica	0,246	215
Superplastificante	0,040	35
Água (a/c=0,23)	0,230	201

Fonte: O autor.

A mistura do CPR foi efetuada inicialmente homogeneizando os materiais em pó. Devido à grande reatividade que ocorre na mistura e à ocorrência de reações exotérmicas (provocadas pela hidratação do cimento), optou-se por utilizar água gelada na tentativa de conter o aumento de temperatura do CPR. Assim, metade da água, a uma temperatura de 10°C, foi adicionada ao misturador, seguida do material em pó já homogeneizado e do restante da água.

A partir do CPR produzido, foram moldados doze corpos de prova cilíndricos de 5cm x 10cm, conforme metodologia da NBR 5738:2015 (ABNT, 2015) para acompanhamento da evolução da resistência à compressão e módulo de elasticidade, nas idades de um, três, sete e vinte e oito dias (foram utilizados os mesmos corpos de prova para ensaios de módulo de elasticidade e compressão). Os corpos de prova foram moldados em camada única e adensados por meio de mesa vibratória durante um tempo de trinta segundos, foram cobertos por placa de vidro untadas com óleo mineral e ficaram em câmara úmida até serem desenformados. Foram moldados, conforme procedimentos da NBR 13279:2005 (ABNT, 2005) três corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm para realização do ensaio de resistência à tração na flexão. São apresentados, na Figura 2-2, alguns desses corpos de prova logo após a moldagem, em câmara úmida, e após a desmoldagem, antes de irem para o tanque de cura.

Figura 2-2-Corpos-de-prova de CPR, cilíndricos e prismáticos: (a) logo após a moldagem na câmara úmida; (b) após serem desenformados, antes de seguirem para o tanque de cura.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Todos os corpos de prova (CP's) permaneceram na forma por um período de vinte e quatro horas conforme NBR 5738:2015 (ABNT, 2015). Após desforma, os CP's foram submersos em um tanque de cura com água saturada em cal hidratada até as idades de ensaio (três, sete e vinte e oito dias), com exceção dos corpos-de-prova programados para ruptura com idade de um dia. Posteriormente, os CP's foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial na máquina universal de ensaios, modelo EMIC MUE 100, segundo a NBR 5739:2007 (ABNT, 2017). O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado conforme a NBR 8522:2017 (ABNT, 2009) e o ensaio de tração na flexão de acordo com a NBR 13279:2005 (ABNT, 2005).

Ainda foi moldado um corpo de prova cúbico com 10cm de aresta com o objetivo de determinar o início e o fim de pega do CPR por meio de propagação de pulsos ultrassônicos por um período de vinte e quatro horas. Foi utilizado um aparelho de propagação de ondas de fabricação da PROCEQ, modelo "PunditLab", apresentado na Figura 2-3, para o monitoramento da pega do CPR.

Figura 2-3-Aparelho de propagação de ondas utilizado na medição do tempo de pega do CPR.



Fonte: O autor.

3. Resultados e discussões

O resíduo de beneficiamento de granito apresentou massa específica de $2,580\text{g/cm}^3$ e área específica de $579,810\text{ m}^2/\text{kg}$. Os resultados dos ensaios do cimento encontram-se na Tabela 2-2. Nota-se que todos os resultados atendem aos requisitos da NBR 16697:2018.

Tabela 2-2 - Dados de Caracterização do Cimento CP-V ARI

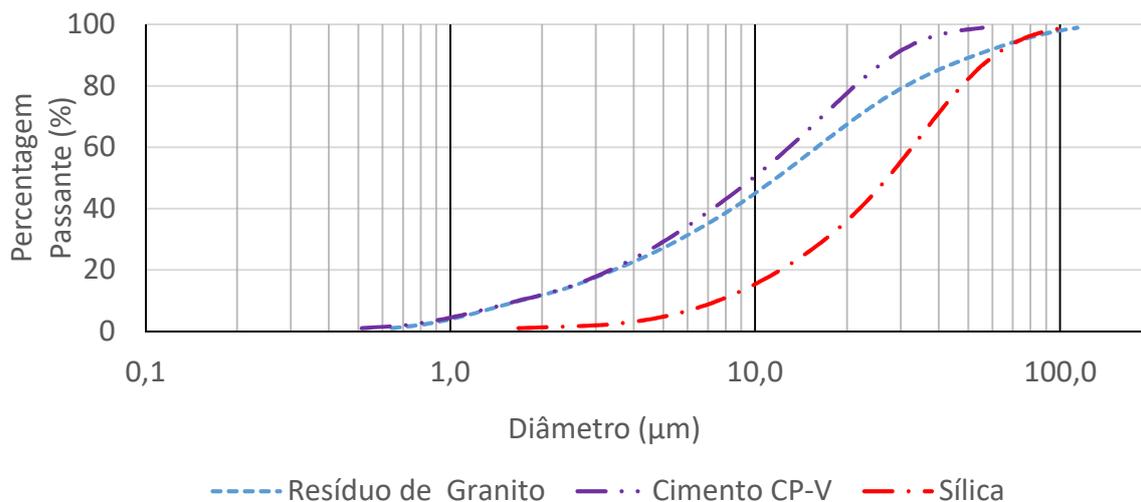
Ensaio	Resultado	Requisitos
Massa Específica (g/cm^3)	3,08	-
Área Específica (m^2/kg)	576,84	-
Finura (%)	0,22	$\leq 6,0$
Pasta de Consistência Normal (g)	140,00	-
Início de Pega (min)	165,00	$\geq 60,0$
Fim de Pega (min)	260,00	$\leq 600,0$
Expansibilidade a Quente (mm)	0,00	$\leq 6,0$
Expansibilidade a Frio (mm)	0,00	$\leq 5,0$

Fonte: O autor.

A sílica ativa empregada apresentou massa específica de $2,200\text{g/cm}^3$ e área específica de $5690,420\text{m}^2/\text{kg}$.

Pode-se observar, na Figura 2-4, as respectivas curvas granulométricas do resíduo de beneficiamento de granito, cimento e sílica, obtidas por granulometria a laser. Todos os materiais possuem dimensão menor que 0,1mm (100µm), sendo o cimento e o resíduo de beneficiamento de granito os que possuem maior proporção com partículas menores, e a sílica um pouco mais grossa.

Figura 2-4- Granulometria do resíduo de beneficiamento, cimento e da sílica.



Fonte: O autor.

A partir da análise química através de EDS, foi possível observar a predominância de cálcio no cimento devida à formação de óxido de cálcio (CaO) na produção do mesmo. Na sílica e no resíduo de beneficiamento de granito, prevaleceu a presença do silício, composto pela formação de quartzo, mineral característico nos dois componentes, principalmente pela formação de dióxido de silício. É apresentada na Tabela 2-3, de forma mais detalhada, a composição química dos materiais.

Tabela 2-3 - Resultados da Espectroscopia de Raio-X.

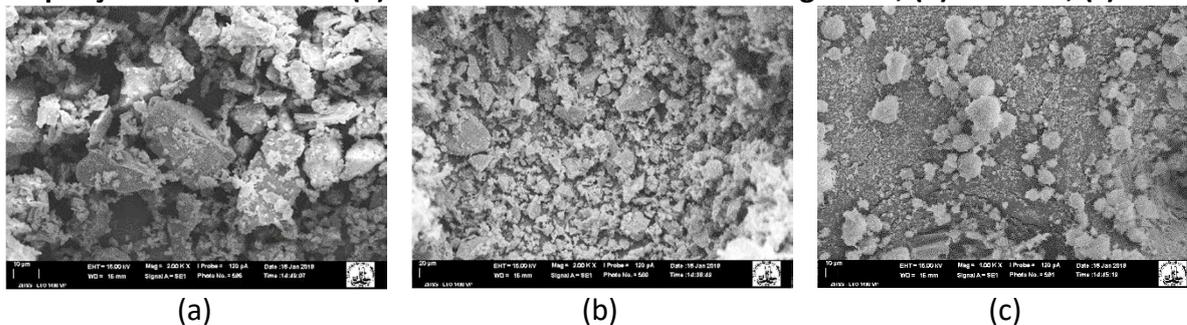
Composição Química das Amostras (%)								
Amostra	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	FeO	MgO	K ₂ O	NaO
Cimento	74,08	12,01	3,97	3,82	2,98	1,66	0,99	0,48
Sílica	1,38	95,59	-	-	-	0,67	1,59	0,76
Resíduo de Granito	-	69,44	15,41	-	-	0,85	6,92	7,38

Fonte: O autor.

Na 5, são apresentadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na Figura 2-5a, o resíduo de beneficiamento de granito apresenta grãos de forma mais angular e pontiaguda, evidenciando os cristais de quartzo em sua estrutura. Na Figura 2-5b, pode-se

observar que o cimento se apresenta em grãos bem finos, com pequenas arestas em sua forma; enquanto na Figura 2-5c, tem-se a sílica, também nitidamente um material fino, porém, diferente do cimento, apresentando grãos mais arredondados.

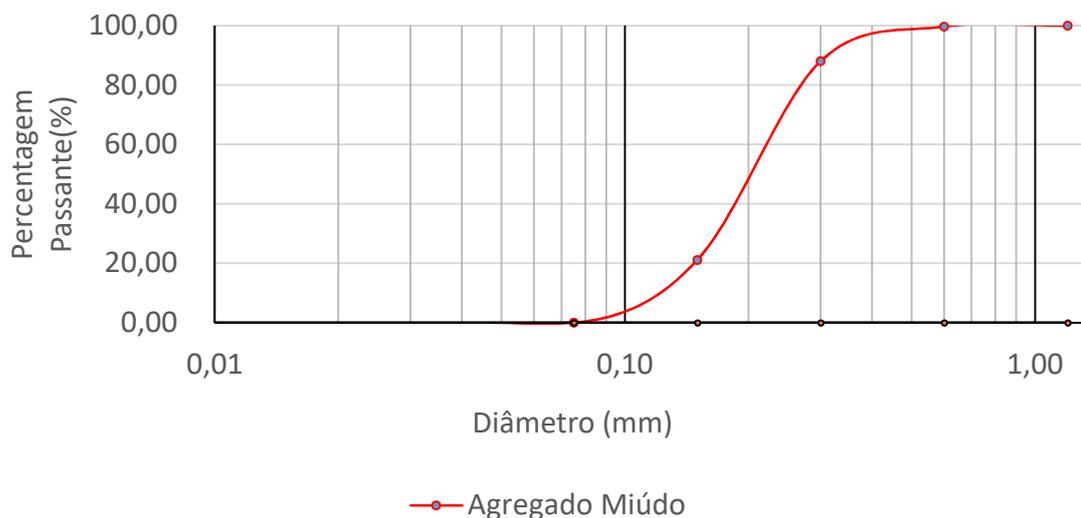
Figura 2-5-Imagens por meio da microscopia eletrônica por varredura (MEV) com uma ampliação de 2 mil vezes: (a) resíduo de beneficiamento de granito; (b) cimento; (c) sílica.



Fonte: O autor.

O agregado miúdo apresentou massa específica de $2,920 \text{ g/cm}^3$ e absorção de água de $0,46\%$. Sua dimensão máxima característica foi de $0,6\text{mm}$ e seu módulo de finura correspondente a $1,91$. Observa-se na curva granulométrica, Figura 2-6, que mais de 80% do agregado miúdo apresentam dimensão inferior a $0,3\text{mm}$, evidenciando o quão fino foi o agregado utilizado.

Figura 2-6-Curva Granulométrica do agregado miúdo.



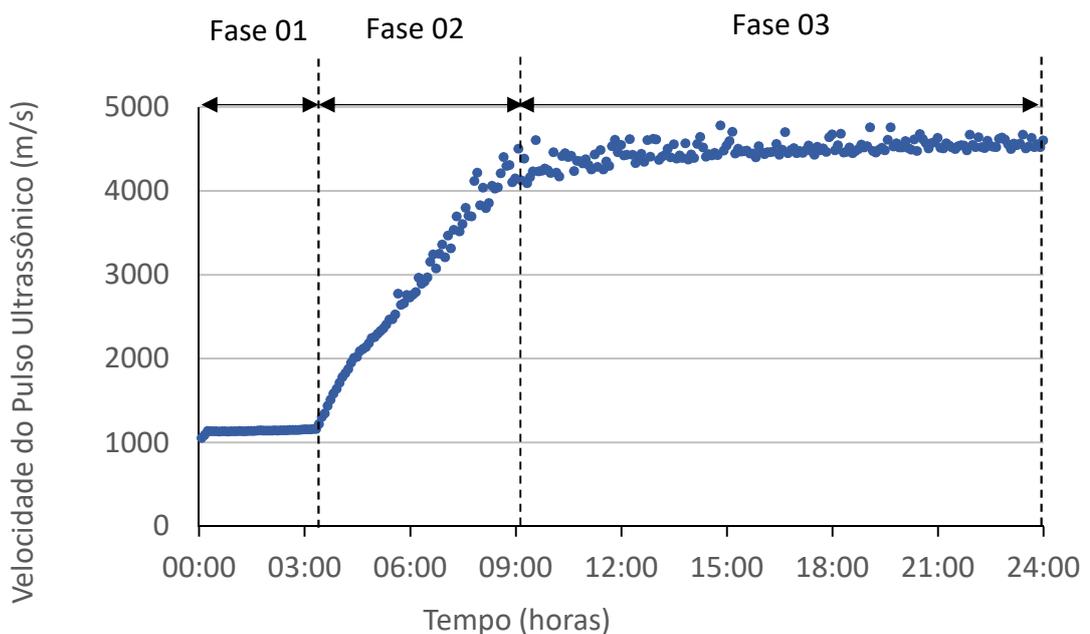
Fonte: O autor.

Na Figura 2-7, é apresentada a curva referente ao ensaio de tempo de pega, realizado com emissão de pulsos ultrassônicos. Observa-se, pelo comportamento da velocidade dos pulsos emitidos, quando começam a ocorrer o início e o final de pega do CPR. A fase 1 pode ser

identificada compreendendo o intervalo de tempo que se dá desde que se adicionou água à mistura até o começo do aumento das reações de hidratação do cimento, que se dá depois de decorridas três horas e trinta minutos. Nota-se que, nesse período, a velocidade do pulso se mantém praticamente constante e em um valor razoavelmente baixo (em um meio fluido), até que, com o aumento das reações, ela começa a se elevar.

A fase 2 é observada no interstício de tempo de três horas e trinta minutos até nove horas depois da adição de água. Nesse intervalo de tempo, a velocidade do pulso aumenta de forma gradual, até atingir o pico, marcando então a desaceleração das reações de hidratação. Nota-se, então, na fase 3, o CPR endurecido, com a velocidade do pulso praticamente constante, porém em um valor bem superior àquele da fase 1.

Figura 2-7-Análise do tempo de pega do CPR por meio de propagação de pulsos ultrassônicos.

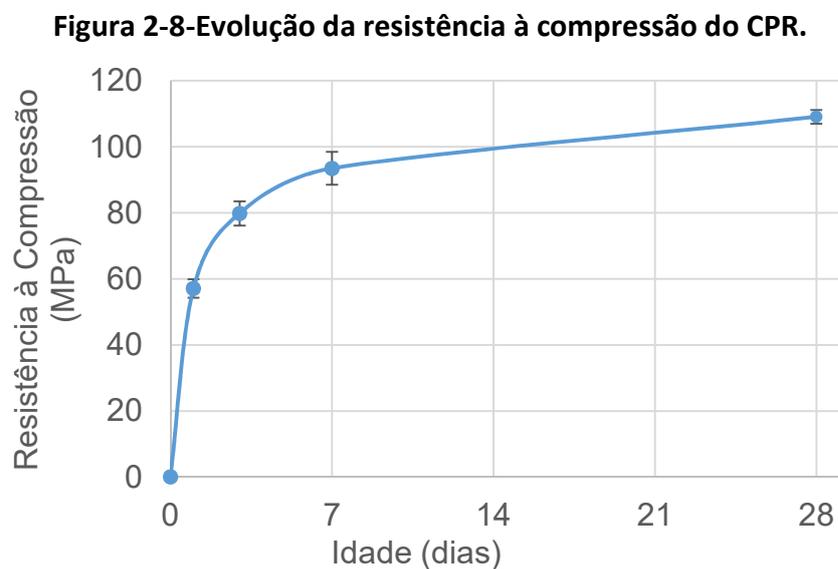


Fonte: O autor.

A avaliação por meio do ultrassom permitiu determinar que o tempo de pega se inicia após decorridas três horas da adição de água à mistura, evidenciando que a perda de consistência durante o manuseio do CPR não se dá pelo início de pega, mas sim pela sensibilidade do CPR ao ambiente com o qual se está trabalhando. Ressalta-se aqui a diferença entre a pega do CPR e do cimento. Enquanto o tempo de pega do cimento se dá após decorrido mais de quatro

horas, o CPR encerra após nove horas. Porém, o CPR encontra-se totalmente endurecido, enquanto o cimento ainda está no início do endurecimento e ainda é frágil.

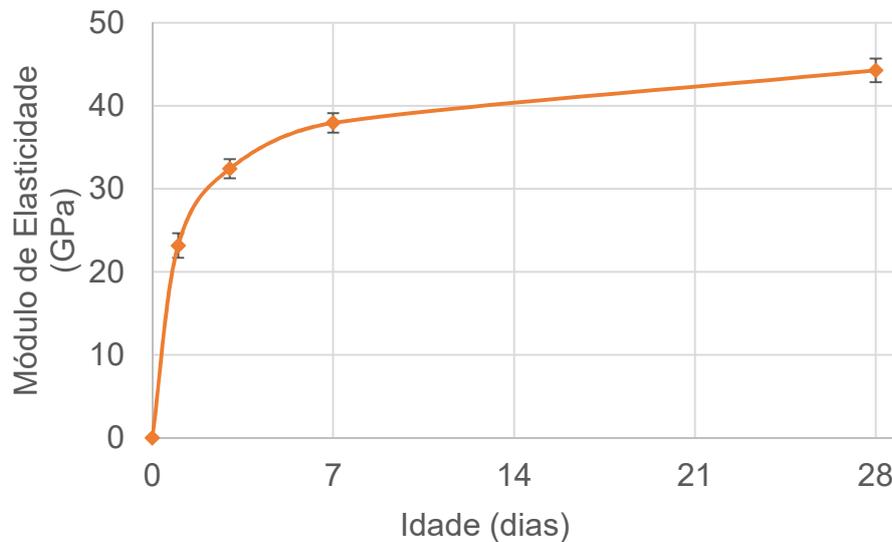
Na Figura 2-8, é apresentada a evolução da resistência à compressão do CPR. É notável o elevado ganho de resistência à compressão nas primeiras idades. Tomando-se a idade de sete dias como referência de resistência à compressão (93,48 MPa), se tratando de um concreto com cimento CP-V, nota-se que com um dia já se tem 61,0% da resistência à compressão enquanto aos vinte e oito dias a mesma supera em 17,6% a resistência à compressão. O desvio padrão máximo foi de 4,98 MPa, aos sete dias de idade.



Fonte: O autor.

O módulo de elasticidade, demonstrado na Figura 2-9, apresentou comportamento semelhante ao da resistência à compressão, demonstrando um ganho mais acentuado nas primeiras idades, até chegar a 44,27 GPa, aos vinte e oito dias de idade.

Figura 2-9-Evolução do módulo de elasticidade do CPR ao longo da idade.



Fonte: O autor.

Foi determinada, ainda, a resistência à tração na flexão, aos 28 dias, a qual atingiu 14,99 MPa, superando a estimativa esperada de 10% da resistência à compressão, atingindo praticamente 14% deste valor. O desvio padrão foi de 0,42 MPa.

Na Tabela 2-4, é apresentada a estimativa de custo para a produção do CPR, com base no custo unitário conforme análise do SINAPI (CEF, 2019), com exceção ao resíduo de beneficiamento de granito. O único custo que recairia sobre o resíduo, na atual situação seria o frete, em função do mesmo, anda, não tem um valor comercial agregado. No entanto este custo foi desconsiderado, pois não houve.

Tabela 2-4- Custo de produção do CPR.

Insumo	CPR		
	Consumo (Kg/m ³)	Custo Unitário	Custo Total (R\$/m ³)
Cimento	874,00	0,43	375,82
Resíduo	209,76	0,00	0,00
Sílica	219,75	2,22	483,35
Aditivo	34,96	9,45	330,37
Areia	961,40	0,041	39,41
Água	201,02	0,006	1,20
Total			1230,15

Fonte: O autor

4. Conclusões

Pode-se concluir que os materiais utilizados para a fabricação do CPR apresentam boas características para a fabricação de micro concretos. Em relação aos materiais, o destaque ficou na utilização de resíduo de beneficiamento de granito, um material oriundo do corte de rochas ornamentais e comumente destinado a aterros. O CPR produzido com sua incorporação resultou em um produto com elevada resistência, atingindo 109,10 MPa, indicando que, aparentemente, a incorporação do resíduo não traz prejuízo às características mecânicas do CPR. Isso acaba sendo vantajoso do ponto de vista econômico, visto que o resíduo ainda não apresenta um valor comercial agregado, e também do ponto de vista ambiental, considerando que uma parcela do resíduo que iria para aterros pode ser destinada a uma finalidade mais nobre e sem causar tanto impacto ao meio ambiente.

O módulo de elasticidade seguiu alinhado às características da resistência à compressão com um ganho acentuado até os sete dias e mais suave dos sete aos vinte e oito dias. A resistência à tração na flexão foi acima do esperado, chegando a quase 15% da resistência à compressão, atingindo 14,9 MPa.

Pode-se concluir também a relevância que do emprego do ultrassom para medição do tempo de pega do concreto, visto que permitiu observar o tempo de pega do CPR.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738:2015 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 11579:2012 Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. ABNT NBR 11582:2016 Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. ABNT NBR 13279:2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. ABNT NBR 16372:2015 Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) – Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 5733:1991 Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

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

_____. ABNT NBR 8522:2003 Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2003.

_____. ABNT NBR NM 26:2009 Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. ABNT NBR NM 16605:2017 Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. ABNT NBR NM 16606:2017 Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

_____. ABNT NBR NM 16607:2017 Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. ASTM C128-15. West Conshohocken, PA, USA. 2015.

BIZ, C. E. Concreto de Pós Reativos. 2001, 101 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CHRIST, R. Contribuição ao Estudo do Concreto de Pós Reativos. 2011, 93 p. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Rio Grande do Sul.

CEF, Caixa Econômica Federal. SINAPI – Índice da Construção Civil. Brasil, Governo Federal. Disponível em: < [http http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx](http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx)>

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; COLLEPARDI, M. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. Proceedings of the Fifth Conference on Super-plasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI Publication V-173, Rome, Italy, pp. 1-22. 1997.

GONÇALVES, D. R. R.; FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag. Waste Management & Research, v. 34, n. 2, p. 107-112, 2016.

HAN, B.; LI, Z.; ZHANG, L.; ZENG, S.; YU, X.; HAN, B.; OU, J.. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂-coated TiO₂. Construction and Building Materials, v148, 104-112, 2017.

ISAIA, G.C. HELENE, P. R. L. TUTIKIAN, B.F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo. Ibracon, 2011, p. 1283-1325. v.2.

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHS, K. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. Waste Management, v. 33, p. 988-1003, 2013.

RICHARD, P. CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. In: Cement and Concrete Research, vol. 25, n. 07, oct, 1995, p.1501-1511.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. Journal of Cleaner Production, 126, p. 74-87, 2016.

VANDERLEI, R. D..Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004

WANG, W; Jiang, D.; Chen, D.; Chen, Z.; Zhou, W.; Zhu, B. A Material Flow Analysis (MFA)-based potential analysis of ecoefficiency indicators of China's cement and cement-based materials industry. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 787-796, 2016.

ZHANG, M.; Wang, Y.; Song, Y.; Zhang, T.; Wang, J. Manifest system for management of non-hazardous industrial solid wastes: results from a Tianjin industrial park. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 252-561, 2016.

Capítulo 3

AVALIAÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO A PARTIR DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS

1. Introdução

O concreto permeável, também conhecido como concreto poroso, é caracterizado por ser uma variedade de concreto com volume de poros interligados entre si. O concreto permeável foi utilizado pela primeira vez em 1852, na Europa, e foi patenteado em 1980, nos Estados Unidos (GRUBEŠA et al., 2018). Li (2009) destaca que, mesmo sendo uma tecnologia antiga, remontando há mais de 160 anos, a utilização do concreto permeável sofreu um grande avanço apenas a partir da década de 1970, nos Estados Unidos, com sua aplicação em estacionamentos e algumas avenidas.

Até hoje, o concreto permeável desperta o interesse em estudos para sua aplicação e disseminação, especialmente por causa das legislações de controle da qualidade da água proveniente do escoamento superficial e do interesse cada vez maior da população em tecnologias que tenham como premissa a preservação do meio ambiente e a redução dos impactos ambientais.

Devido aos vários benefícios ambientais, o concreto permeável é considerado uma das mais importantes soluções para instalações e infraestruturas sustentáveis, tanto que, nos Estados Unidos, é reconhecido como a melhor opção para solução de gestão em águas pluviais pela Agência de Proteção Ambiental local, por apresentar como principais vantagens a capacidade de permitir a rápida infiltração das águas de chuvas, manter o solo abaixo do pavimento úmido, contribuindo para manutenção do nível do lençol freático, absorver ruídos de veículos, devido a sua estrutura porosa, e por contribuir para o ajuste da temperatura ambiente, permitindo a evaporação da água acumulada em seu interior, minimizando os fenômenos de “ilha de calor” em grandes centros(NGUYEN et al., 2014).

Deo e Neithalath (2010) sugerem que um concreto com essas características pode ser obtido através da utilização de agregados graúdos, de graduação contínua, juntamente com a redução ou eliminação do agregado miúdo na produção do concreto, o que resulta em um material com porosidade em torno de 15% a 30% de seu volume total. Devido a essa

porosidade elevada, este tipo de concreto possui uma permeabilidade à água podendo variar de 0,2 a 0,6 cm/s (TENNIS et al., 2004).

O American Concrete Institute (ACI, 2013) define o concreto permeável como o concreto que contém pouco ou nenhum agregado miúdo, o que resulta em espaços entre um agregado graúdo e outro, permitindo a passagem de fluidos por meio de sua estrutura. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 16.416:2015 -Pavimentos Permeáveis de Concreto - Requisitos e Procedimentos (ABNT, 2015), define o concreto permeável como um concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade.

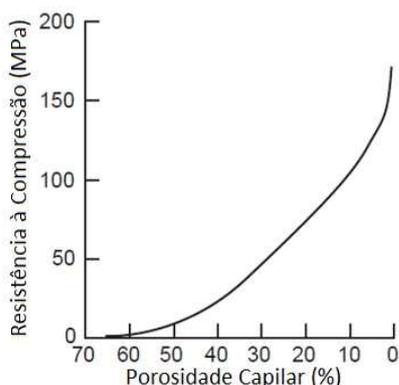
Delatte e Clearly (2006) classificam o concreto permeável em três subtipos de acordo com sua capacidade de resistência à compressão e permeabilidade. O primeiro, concreto permeável hidráulico, possui baixa resistência e elevada permeabilidade, utilizado em locais que não demandam muito esforço e desgaste. O segundo, concreto permeável normal, possui resistência e permeabilidade intermediárias, sendo aplicado em calçadas, onde tem baixo esforço mecânico. Por último, o concreto permeável estrutural, que apresenta elevada resistência e baixa permeabilidade, aplicado em estacionamentos e ruas onde há tráfego de veículos leves e pesados.

A grande dificuldade em se trabalhar o concreto poroso é obter um produto que apresente ao mesmo tempo boa resistência à compressão e permeabilidade suficiente para permitir a drenagem da água em sua superfície. Alguns autores citam concretos com resistências baixas devido à sua porosidade variando entre 10 e 25%, e suas resistências à compressão variando de 10,3 MPa a 13,8 MPa (AKAND et al., 2016), 7,0 MPa a 25,0 MPa (SCHAEFER et al., 2006), evidenciando assim que a porosidade e a resistência à compressão do concreto são inversamente proporcionais.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a relação porosidade versus resistência é comum a diversos materiais. Entretanto, no concreto, as microfissuras existentes na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz principal fazem deste um material complexo para uma relação exata de porosidade versus resistência. Mesmo assim, essa relação deve ser respeitada, pois a porosidade das fases de um concreto, incluindo a zona de transição, pode

se tornar um fator limitante de sua resistência. Assim, é representado, no gráfico da Figura 3-1, o comportamento da resistência à compressão em função da porosidade do concreto convencional.

Figura 3-1-Relação entre a resistência à compressão e a porosidade dos materiais sólidos – cimentos submetidos a cura em condições normais e cura em autoclave e agregados.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008).

A resistência do concreto permeável se dá pelo contato entre os grãos que são ligados pelo aglomerante. A fim de aumentar esse contato, pode-se empregar agregado miúdo ou outros materiais finos que possam ser adicionados ao concreto, o que pode vir a interferir na porosidade do material. Além disso, a adição de aditivos redutores de água pode contribuir para o ganho de resistência mecânica, uma vez que se pode reduzir a relação água-cimento (a/c) da mistura segundo Zhong e Wille (2016).

Assim, optou-se pela substituição da pasta de cimento, comumente utilizada na fabricação de concreto permeável convencional, por concreto de pós reativos (CPR) para a adequada aglutinação do agregado graúdo. O CPR é uma classe de concreto de alto desempenho que alcança resistências superiores a 150 MPa (VIGNESHWARI et al., 2018), sendo composto por cimento, sílica, pós de quartzo, areia fina e aditivos superplastificantes (HADI et al., 2018).

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo a obtenção de um concreto permeável, avaliando como a proporção da adição de agregado graúdo ao CPR pode influenciar a resistência mecânica e a permeabilidade do concreto. Além da alta resistência à compressão, o CPR foi empregado nesse estudo devido à perspectiva de boa aderência à diversas superfícies que o mesmo apresenta, conforme Tayeh et al. (2015). É isento de agregado graúdo e apresenta estrutura densa em seu estado fresco. Além disso, foi avaliada a influência

da forma do agregado graúdo em relação à permeabilidade e a resistência à compressão do concreto permeável proposto.

2. Materiais e Métodos

Para a fabricação do concreto permeável, foram utilizados dois tipos de agregado graúdo da região de Belo Horizonte - MG. Um fabricado por meio de britador VSI (Vertical Shaft Impactor), que deixa o grão com forma mais arredondada, e outro por meio de britador convencional, de mandíbulas, que resulta em um agregado graúdo com formas mais angulares e lamelares. A diferença na forma dos grãos pode ser observada na Figura 3-2, onde pode-se verificar o formato mais arredondado dos grãos da brita 0 VSI (Figura 3-2a) e o formato mais angulado da brita 0 convencional (Figura 3-2b).

Figura 3-2-Tipos de brita utilizados conforme formato do grão: (a) Brita 0 VSI; (b) Brita 0 convencional.



Fonte: O autor.

Os dois tipos de agregado graúdo foram caracterizados em laboratório, sendo determinado sua granulometria, conforme procedimentos da NBR 248:2003 (ABNT, 2003), massa unitária no estado seco e solto e seco e compactado, seguindo a NBR NM 45:2009 (ABNT, 2009), massa específica e absorção, de acordo com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009) e índice de forma conforme DNRR-ME 086/94 (DNIT, 1994).

O concreto de pós reativos (CPR) foi produzido com agregado miúdo artificial, da cidade de São Geraldo-MG, originado da britagem e moagem de rocha granítica e separado por processo de peneiramento. O cimento Portland utilizado foi do tipo CP-V ARI, aditivo superplastificante de terceira geração, sílica ativa da água proveniente do sistema de tratamento da UFV e resíduo de corte de granito oriundo da cidade de Cachoeiro do Itapemirim-ES.

O resíduo de granito entrou na mistura em substituição ao pó de quartzo com o intuito de dar uma destinação adequada ao material que é um problema para as indústrias beneficiadoras

de rochas ornamentais. Apresenta-se na forma de um pó branco, após sua secagem. Possui massa específica de $2,580\text{g/cm}^3$, conforme NBR 16605:2017 (ABNT, 2017), e área específica de $579,810\text{ m}^2/\text{kg}$, conforme NBR 16372:2015 (ABNT, 2015). A sílica ativa empregada na pesquisa apresenta massa específica de $2,200\text{ g/cm}^3$ e área específica de $5690,420\text{m}^2/\text{kg}$, calculada de acordo com as normas NBR16605:2017 (ABNT, 2017) e NBR 16372:2015 (ABNT, 2015) respectivamente. O cimento possui massa específica de $3,080\text{ g/cm}^3$ e área específica de $576,84\text{ m}^2/\text{kg}$, calculada pelas normas NBR16605:2017 (ABNT, 2017) e NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente.

O agregado miúdo apresentou massa específica de $2,920\text{ g/cm}^3$ e absorção de água de $0,46\%$, conforme ASTM C128-15 (ASTM, 2015). Sua dimensão máxima característica foi de $0,6\text{mm}$ e seu módulo de finura correspondente a $1,91$, determinados através do ensaio de granulometria, conforme NBR NM 248:2003(ABNT, 2003). O teor de material pulverulento foi desconsiderado, pois, após o peneiramento, todo material coletado foi lavado sobre a peneira de malha de $0,075\text{mm}$ para eliminação de material fino.

A dosagem do CPR, descrita no capítulo 2, foi realizada conforme Tabela 3-1, adaptando a relação água/cimento para que pudesse ser adicionado o agregado graúdo e obter uma boa trabalhabilidade. Assim, foi adotada uma relação água/cimento de $0,23$. Tomando-se o CPR como referência de massa unitária, foi possível variar a massa de agregado graúdo a fim de obter a relação de CPR/agregado (em massa) que apresentasse melhor resultado.

Tabela 3-1 - Traço e consumo de materiais utilizados para produção de concreto de pós reativos. Adaptado de Vanderlei (2004).

Material	Relação em massa	Consumo (kg/m^3)
Cimento	1,00	874
Areia	1,101	962
Resíduo de Granito	0,235	205
Sílica	0,246	215
Superplastificante	0,04	35
Água	0,23	201

Fonte: O autor.

A dosagem do CPR foi efetuada, inicialmente, homogeneizando os materiais em pó. Depois, metade da água foi adicionada ao misturador, em seguida o material em pó já homogeneizado

e por fim o restante da água. A partir do CPR misturado, parte deste foi utilizado para moldagem de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, conforme procedimentos descritos no capítulo 2 deste trabalho. O restante foi levado novamente ao misturador para a adição do agregado graúdo de forma gradual para uma melhor homogeneização. Assim, o CPR juntamente com o agregado graúdo foi misturado por três minutos, até que todo o agregado graúdo estivesse coberto por uma camada de CPR.

Dessa mistura, foram moldados doze corpos de prova, em forma de paver para pavimento intertravado, com dimensões de 10cm x 20cm x 8cm para o ensaio de resistência à compressão, e seis corpos de prova cúbicos, de arestas medindo 10cm, para determinação da permeabilidade, absorção de água, massa específica e porosidade do concreto. Ambos modelos de corpos de prova foram moldados em duas camadas, adensadas por 30 segundos em mesa vibratória. A partir dos corpos de prova cúbicos, foram extraídos, por meio de extratora rotativa, corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 9,2 cm, para a realização dos ensaios pertinentes. Esses procedimentos foram adotados na falta de normatização específica par sua realização.

Todos os corpos de prova permaneceram na forma por um período de vinte e quatro horas. Após a desforma, seguiram para um tanque de cura submersa, com água e cal hidratada, até as idades de ensaio. Os CPR's foram ensaiados com um, três, sete e vinte e oito dias de idade. Os pavers ensaiados aos sete e vinte e oito dias, e os cúbicos somente aos 28 dias, pressupondo-se que a permeabilidade não é afetada conforme varia a idade do concreto permeável, em um curto espaço de tempo. Na Tabela 3-2, é apresentado o planejamento com as quantidades de corpos de prova ensaiados.

Tabela 3-2 - Planejamento experimental.

Planejamento de Ensaios no concreto permeável e no CPR				
Tipo de Ensaio	Traços	Idades	Qtd. Por idade	Qtd. Total
Compressão CPR	8	4	3	96
Compressão Concreto Permeável	8	2	6	96
Absorção Concreto Permeável				
Permeabilidade Concreto Permeável	8	1	6	48
Porosidade Concreto Permeável				
Massa específica Concreto Permeável				

Fonte: O autor

Os traços foram nomeados de acordo com a relação de massa entre o CPR e o agregado graúdo (1:3,0; 1:3,5; 1:4,0; 1:4,5), antecedidos pelas iniciais do processo de britagem do agregado graúdo, VSI ou CONV.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados por meio da máquina universal de ensaios, modelo EMIC MUE 100. Os corpos de prova de CPR foram rompidos seguindo os parâmetros da NBR 5739:2007 (ABNT, 2007). Os pavers foram ensaiados conforme parâmetros da NBR9781:2013, (ABNT, 2013) seguindo recomendações da NBR 16416:2015 (ABNT, 2015). As superfícies superiores e inferiores foram capeadas com argamassa de cimento e areia fina a fim de se obter duas superfícies regulares, planas e paralelas antes da realização do ensaio. São apresentadas, na Figura 3-3, as etapas decorridas para a produção, como a moldagem, processo de cura, capeamento e ensaio de compressão nos pavers.

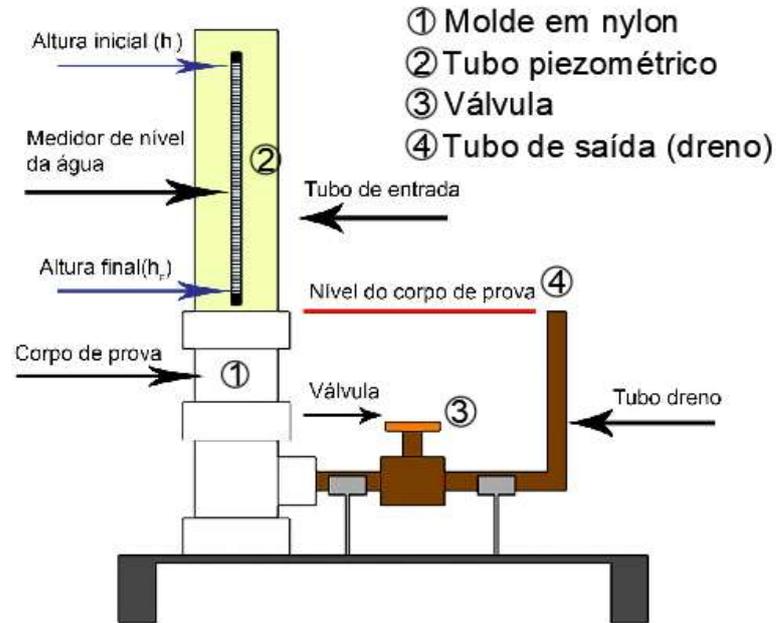
Figura 3-3-Etapas de produção e ensaio de compressão axial dos pavers: (a) moldagem; (b) cura; (c) capeamento; (d) ensaio de compressão.



Fonte: O autor.

O ensaio de permeabilidade foi realizado por meio de um permeâmetro de carga variável, conforme recomendado pelo ACI 522R6 (ACI, 2006) e idealizado por Neithalath et al. (2003), e avaliado segundo os parâmetros da NBR 16416:2015 (ABNT, 2015). É apresentado, na Figura 3-4, o permeâmetro utilizado neste trabalho, adaptado de Neithalath et al. (2003).

Figura 3-4-Permeâmetro de carga variável utilizado no ensaio de permeabilidade do concreto.



Fonte: O autor.

O ensaio consiste em colocar um corpo de prova de concreto permeável, encamisado por uma membrana de borracha, dentro de um tubo (molde de nylon, indicado pelo número 1 na Figura 3-4). Acima deste tubo, há uma coluna de PVC graduada em centímetros (de forma decrescente) para determinação do nível d'água durante o ensaio, através do tubo piezométrico (número 02, Figura 3-4). Abaixo do tubo onde está o corpo de prova, há uma saída, para que se possa realizar o fluxo d'água. Nesta saída, é conectada uma válvula para controle durante o ensaio (número 03, Figura 3-4). A válvula, por sua vez, se conecta a um tubo de saída vertical, com altura ajustada à altura do corpo de prova. Quando a válvula é aberta, a água do reservatório começa a permear através do concreto, já saturado, até que todo o excesso seja drenado pelo tubo de saída vertical (número 4, Figura 3-4), equalizando a altura da água exatamente 1 mm acima do topo do corpo de prova.

É apresentado, na Figura 3-5, o corpo de prova envolto por uma membrana de borracha (4-5a), o permeômetro montado (4-5b) e o ensaio em execução (4-5c).

Figura 3-5-Execução do ensaio de permeabilidade: (a) corpo de prova encamisado; (b) permeâmetro montado; (c) execução.



(a)

(b)

(c)

Fonte: O autor.

Por meio da Equação 1 e dos dados colhidos durante o ensaio, é possível calcular a permeabilidade do corpo de prova analisado:

$$K = \frac{A_1 \times l}{A_2 \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

K é o coeficiente de permeabilidade, expresso em centímetros por segundo (cm/s);

A_1 é a área da sessão transversal da amostra, expressa em centímetros quadrados (cm²);

A_2 é a área do tubo, expressa em centímetros quadrados (cm²);

l é o comprimento do tubo, expresso em centímetros (cm);

t é o tempo de duração do ensaio, expresso em segundos (s);

h_1 é a altura inicial da coluna de água, expressa em centímetros (cm);

h_2 é a altura final da coluna de água, expressa em centímetros (cm).

Os ensaios de massa específica e porosidade do concreto permeável foram realizados seguindo procedimentos da ABNT NBR 9778:2005 (ABNT, 2005).

3. Resultados e discussões

Na, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são apresentadas as características físicas dos dois tipos de agregados utilizados nesse trabalho. Ambos agregados apresentam dimensão máxima característica de 12,5mm. O agregado tipo VSI apresenta módulo de finura de 6,71 contra 6,56 do convencional. A massa unitária e a massa específica ficaram em valores muito próximos, distanciando um pouco quanto à absorção d'água, visto que o agregado VSI apresentou um índice de absorção de 0,39% e o convencional de 0,47%.

O índice de forma foi calculado conforme recomendações da norma DNER-ME 086/94 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 1994), com índice de 0,73 para o agregado VSI e 0,74 para o agregado convencional. Contudo, é possível observar a diferença na forma dos mesmos, possuindo o VSI um formato mais arredondado e sem arestas vivas, diferente do convencional.

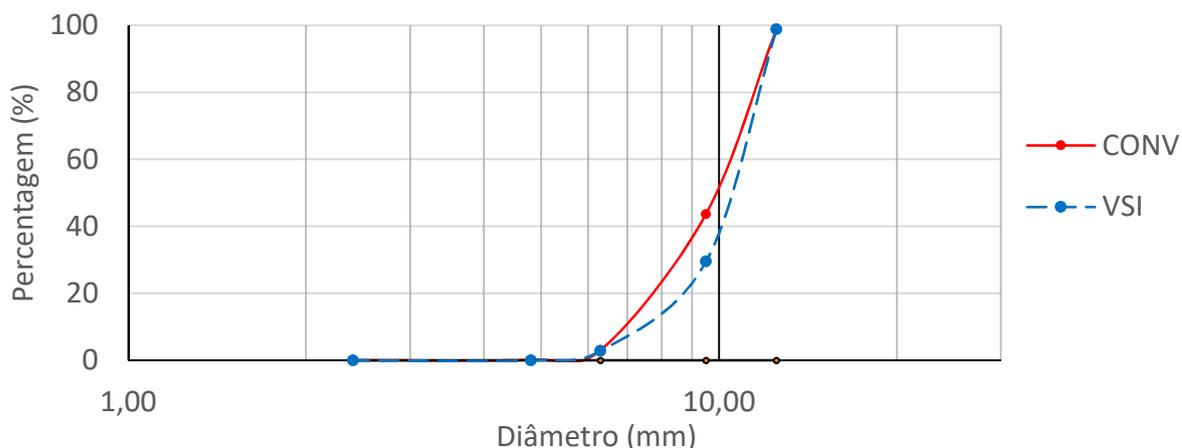
Tabela 3-3 - Caracterização do agregado graúdo.

Ensaio	Características Físicas		Norma
	VSI	CONV	
Dim. Máxima (mm)	12,50	12,50	NM 248:2003
Módulo de Finura	6,71	6,56	NM 248:2003
Massa Unitária Estado Solto (g/cm ³)	1,44	1,38	NM 45:2006
Massa Unitária Compactado (g/cm ³)	1,53	1,49	NM 45:2006
Massa Específica (g/cm ³)	2,66	2,64	NM 53:2009
Absorção (%)	0,39	0,47	NM 53:2009
Índice de Forma	0,73	0,74	DNER-ME 086/94

Fonte: O autor.

É apresentada, na Figura 3-6, a granulometria dos agregados. Observa-se grande quantidade de material passante na peneira de 12,5mm e retido na de 9,5mm, mais de 50%, seguido por outra fração significativa retida na peneira de 4,80mm. Os dois agregados têm distribuição granulométrica semelhante.

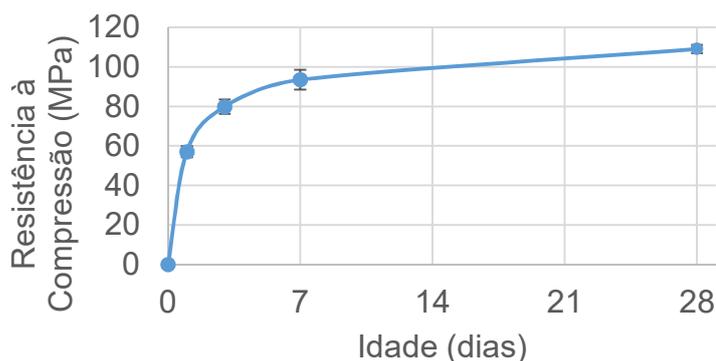
Figura 3-6-Curva granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: O autor.

São apresentados a seguir os resultados dos ensaios realizados, enfatizando aqui a permeabilidade à água e a resistência à compressão. Os dados foram tratados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), e, quando encontradas diferenças significativas, procedeu-se ao teste de comparações múltiplas (teste de Tukey) a um nível de significância de 5%. Além disso, foi avaliada a existência de outliers por meio do Critério de Chauvenet, onde os valores que se afastam dos demais são eliminados do cálculo das médias. É apresentada, na Figura 3-7, a evolução da resistência à compressão do CPR.

Figura 3-7-Evolução da resistência à compressão do CPR.



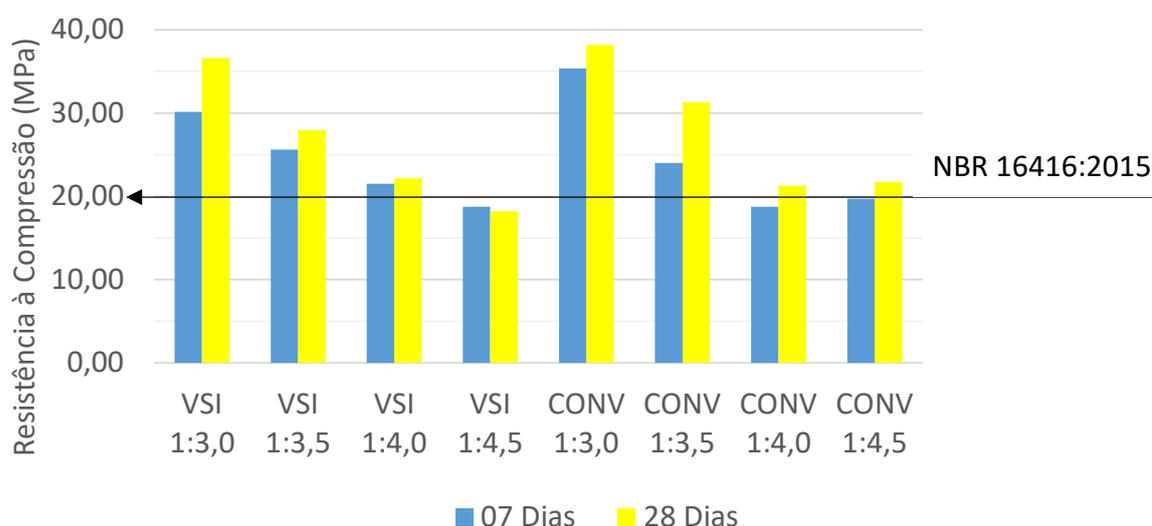
Fonte: O autor.

É notável o elevado ganho de resistência à compressão nas primeiras idades. Tomando-se a idade de sete dias como referência de resistência à compressão (93,48 MPa), se tratando de um concreto com cimento CP-V, nota-se que com um dia já se tem 61,0% da resistência à com

pressão enquanto aos vinte e oito dias a mesma supera em 17,6% a resistência à compressão. O desvio padrão máximo foi de 4,98 MPa, aos sete dias de idade.

Na Figura 3-8, é apresentada a evolução da resistência à compressão dos pavers, sendo possível observar que, com exceção do traço VSI 1:4,5, todos os outros obtiveram resistências à compressão superiores a 20,0 MPa aos 28 dias de idade, indo ao encontro do mínimo estipulado pela NBR 16416:2015. Nota-se ainda que a evolução da resistência de 07 aos 28 dias foi relativamente pequena, mas sendo importante para que se enquadrasse dentro dos parâmetros da norma.

Figura 3-8-Evolução da resistência à compressão dos pavers com o tempo de cura.

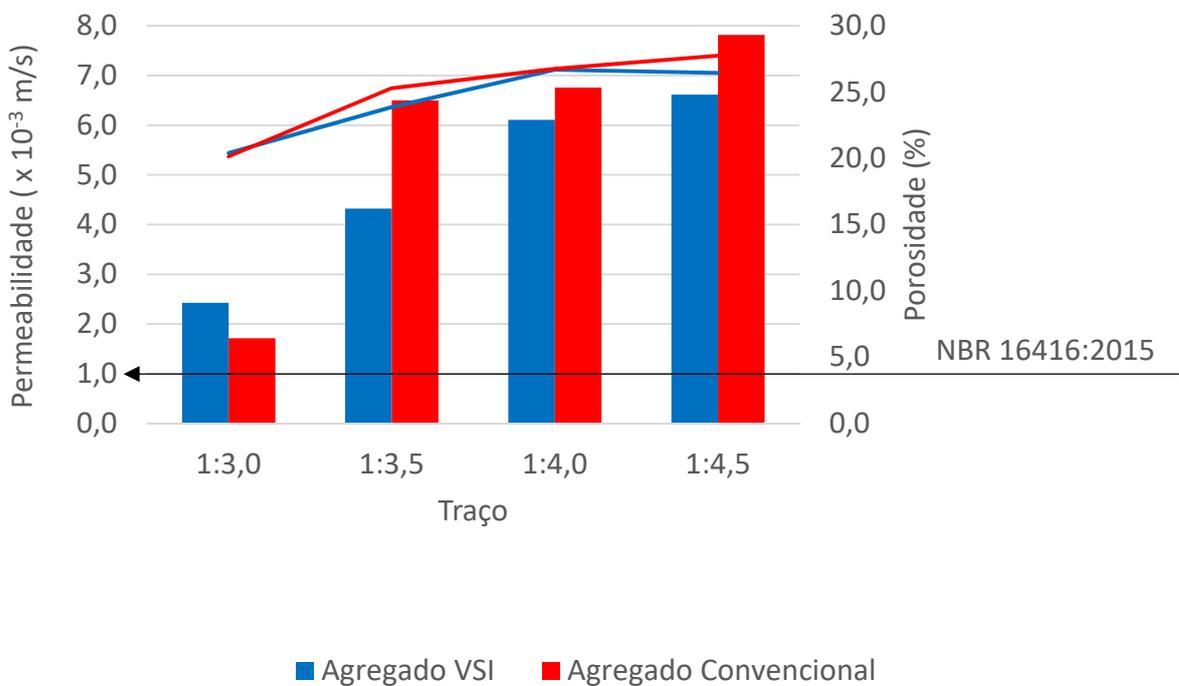


Fonte: O autor.

Estatisticamente, aos sete dias, o traço CONV1:3, com brita convencional, se diferenciou dos demais, apresentando a maior resistência e o único a alcançar os 35,0 MPa para um nível de significância de 5%. Aos vinte e oito dias, não houve diferença significativa entre o traço 1:3 utilizando brita convencional (CONV) e VSI, sendo os melhores traços perante os demais e os únicos que superaram o limite mínimo da NBR 9781:2013 (ABNT, 2013). Os resultados obtidos superam boa parte do que é encontrado na literatura e descrito na revisão deste trabalho. Batezini (2013) alcançou 10,0 MPa, Alves (2016) chegou aos 16,6 MPa, e Tavares e Kazmierczak (2016) alcançaram pouco mais de 22,0 MPa.

Observa-se, no gráfico da Figura 3-9, que a permeabilidade foi satisfatória em todos os traços experimentais utilizando o agregado do tipo VSI, visto que a NBR 16416:2015 (ABNT, 2015) estabelece que o mínimo seja de 10^{-3} m/s. Foi alcançada uma permeabilidade variando de $2,5 \times 10^{-3}$ m/s até $6,5 \times 10^{-3}$ m/s. A porosidade seguiu a mesma tendência, variando de 20,40% a 26,67%, sendo os maiores valores referentes aos traços com maior proporção de agregado, traços VSI 1:4,0 e VSI 1:4,5. Esses resultados vão ao encontro do esperado, considerando que, à medida que se aumenta o consumo de agregado graúdo e se mantém o consumo de CPR, a tendência é de que os vazios aumentem, mostrando a dependência da permeabilidade em relação à porosidade.

Figura 3-9-Comparativo entre a permeabilidade e a porosidade dos traços.



Os traços realizados com agregado convencional apresentaram comportamentos semelhantes aos que utilizaram agregado VSI. A permeabilidade variou de $1,7 \times 10^{-3}$ m/s até $7,8 \times 10^{-3}$ m/s, situando-se entre os valores de $0,14 \times 10^{-3}$ m/s à $11,9 \times 10^{-2}$ m/s, encontrados por Monstes e Haselbach (2006), próximos a Batezini e Balbo (2015) que obtiveram resultados variando entre $5,0 \times 10^{-3}$ e $7,0 \times 10^{-3}$ m/s, e superiores aos valores obtidos por Tavares e Kamierczak (2016), que alcançaram o máximo de $1,5 \times 10^{-3}$ m/s.

A porosidade evoluiu gradativamente, variando de 20,13% no traço 1:3,0, alcançando 27,75% no traço de 1:4,5. A porosidade se enquadra dentro dos valores citados na literatura, entre 15% e 30% (AKAND et al., 2016, SCHAEFER et al., 2006). A porosidade está diretamente relacionada ao grau de permeabilidade que o concreto pode apresentar, que por sua vez está relacionada à quantidade de agregado graúdo empregada na mistura, visto que, quanto maior esta for, maior será a porosidade

Pode-se observar que, quanto maiores a porosidade e a permeabilidade, menor é a resistência à compressão, para ambos os agregados utilizados. As maiores resistências ficaram a cargo do traço 1:3,0, tanto pra agregado VSI quanto convencional. Os traços 1:3, com agregado VSI e convencional, foram, ainda, os que apresentaram as menores permeabilidades, mas mesmo assim consideravelmente superiores ao mínimo estipulado pela NBR 16416:2015 (ABNT, 2015).

Observa-se ainda que, em relação à resistência à compressão, estatisticamente, a um nível de significância de 5%, o traço com agregado convencional CONV 1:3,0 apresentou a melhor resistência à idade de 07 dias, sendo seguido pelo traço com agregado VSI 1:3,0. Para a idade de 28 dias, o teste de Tukey indicou que os dois traços são estatisticamente iguais, sendo os mais resistentes entre os demais.

Avaliando a permeabilidade por meio do Teste de Tukey, pode-se observar que os traços com agregados convencional e VSI 1:3,0 foram os menos permeáveis e estatisticamente iguais. O mesmo pode ser constatado para a porosidade. Esses resultados já eram esperados frente aos resultados de resistência à compressão, sendo grandezas inversamente proporcionais.

É apresentada, na Tabela 3-4, a composição de custo para a produção de concreto permeável, com base no custo unitário conforme análise do SINAPI (CEF, 2019), conforme traços estudados. Observa-se que quanto menor a quantidade de agregado graúdo utilizado maior é o custo por m³ de concreto, evidenciando, assim, que, além de aumentar a permeabilidade, o agregado graúdo acaba por reduzir o custo da produção.

Tabela 3-4-Custo de produção do concreto permeável proposto, por traço.

Insumo	Traço							
	1:3,0		1:3,5		1:4,0		1:4,5	
	Consumo (Kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)						
Cimento	220,94	93,90	198,28	84,27	177,36	75,38	158,17	67,22
Resíduo	53,03	0,00	47,59	0,00	42,57	0,00	37,96	0,00
Sílica	55,55	123,32	49,85	110,68	44,59	99,00	39,77	88,29
Aditivo	8,84	83,52	7,93	74,95	7,09	67,04	6,33	59,79
Areia	243,04	9,88	218,11	8,87	195,10	7,93	173,99	7,07
Água	50,82	0,28	45,61	0,25	40,79	0,22	36,38	0,20
Brita	1945,69	112,19	2037,15	117,46	2082,54	120,08	2089,36	120,47
Total		423,09		396,48		369,66		343,05

Fonte: O autor.

4. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que, à medida que se aumentava o teor de agregado graúdo em relação ao CPR a relação entre a resistência à compressão e a Permeabilidade se comportavam de forma inversamente proporcional. A medida que a resistência diminuía o grau de permeabilidade aumentava, acompanhado também pelo aumento da porosidade.

Pode-se, ainda, inferir que, a boa aderência que o CPR apresenta, conforme constado por Tayeh et al. (2015) e Lee et al. (2004), tenha contribuído para que os ensaio de resistência apresentasse bom resultado, ao envolver o agregado graúdo.

Analisando a classificação de Delatte e Clearly (2009) e comparando com os valores propostos pela NBR 16416:2015 (ABNT2015), é possível considerar que todos os traços são do tipo “permeável estrutural”, visto que foram atendidos os requisitos de permeabilidade e resistência. Comparando-se com a NBR 16416:2015 (ABNT, 2015) e a NBR 9781:2013 (ABNT, 2013), pode-se classificar apenas os que atingiram 35,0 MPa como concreto permeável estrutural e os demais como concreto permeável normal.

Em relação ao custo, pode-se observar que o concreto permeável produzido com CPR acarreta uma considerável redução no custo por metro cúbico.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio – Rio de Janeiro, 1987.

_____. ABNT NBR 16372:2015 Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) – Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. ABNT NBR 9778:2005 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Rio de Janeiro, 2005.

_____. ABNT NBR NM 16605:2017 Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica– Rio de Janeiro, 2017.

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

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

_____. ABNT NBR 16416:2015 Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos – Rio de Janeiro, 2015.

AKAND, L.; YANG, M.; GAO, Z. Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. Construction and Building Materials. Elsevier. 1 July 2016. P.547-555.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI CT-13 Concrete Terminology. Farmington Hills-MI, 2013.

_____. ACI 522R6 Pervious Concrete. Farmington Hills-MI, 2006

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. ASTM C128-15. West Conshohocken, PA, USA. 2015

BATEZINI, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação (Mestrado em Engenharia de transportes-Infraestrutura de transportes. Escola politécnica da Universidade de São Paulo - SP, 2013.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V8, N3. P. 248-259. 2015.

CEF, Caixa Econômica Federal. SINAPI – Índice da Construção Civil. Brasil, Governo Federal. Disponível em:< [http http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx](http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx)>

DELLATE, N; CLEARY, J. Developing a Structural Design Method for Pervious Concrete Pavement. Disponível em: <http://www.nssga.org/aftre/Symposium/2006-06.pdf> Acesso: 11 nov. 2016

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, Mater. Sci. Eng., A 528 p.402–412. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 086/94 Agregado – Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

GRUBEŠA, I. N.; BARIŠIĆ, I.; DUCMAN, V.; KORAT, L. Draining capability of single-sized pervious concrete. Construction and Building Materials. Elsevier. 30 April 2018. P.252-260. 2018.

HADI, M. N. S; ALGBURI, A. H. M.; SHEIK, M. N.; CARRIGAN, A. T. Axial and flexural behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with reactive powder concrete jacket and fibre reinforced polymer wrapping. Construction and Building Materials. Elsevier. 06 April 2018. P.717-727. 2018

LI, J. Mix Design of Pervious Recycled Concrete. Geo Hunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements. V. 195, n. 15, p. 103–108, Ago. 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2008. 674p. 2008.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. Environmental Engineering Science V. 23, p. 960-969, 2006.

NEITHALATH, N., WEISS, W.J., AND OLEK, J. Enhanced Porosity Concrete: Electrical Impedance, Acoustic Absorption, and Hydraulic Permeability. Presented at the ACI Fall. Convention, Boston, 2003.

NGUYEN, D. H., SEBAIBI, N., BOUTOUIL, M., LELEYTER, L., BARAUD, FABIENNE. A modified method for the design of pervious concrete mix. Construction and Building Materials. Elsevier. 30 December 2014 p. 271-282.

SCHAEFER, V.R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J. T. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates, Final Report. National Concrete. Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA, 2006.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V9, N1. P. 75-90. 2016.

TAYEH, B.A. ABU BAKAR, B.H. MEGAT JOHARI, M.A. Assessment of adhesion between RPC overlay and existing concrete substrate, Applied Mechanics and Materials Vol. 802 (2015) pp 95-100.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D. J. Pervious concrete pavements, EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004.

VANDERLEI, R. D. Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VIGNESHWARI, M.; ARUNACHALAM, K.; ANGAYARKANNI, A. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. Journal of Cleaner Production. Elsevier. 1 July 2018 p264-277.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. Construction and Building Materials. Elsevier. April 2016 p177-187.

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos demonstram o potencial que há na produção de concreto permeável empregando o CPR. Com os traços trabalhados, foram obtidos valores de resistência à compressão variando entre 18,21 MPa e 38,19 MPa, ligeiramente superiores aos encontrados na literatura. Do mesmo modo, os valores de permeabilidade foram bem expressivos, indo de $1,7 \times 10^{-3}$ m/s até $7,8 \times 10^{-3}$ m/s. Em ambas grandezas, os valores encontrados atendem aos requisitos da NBR 16416:2015, indo bem além do mínimo estabelecido para a permeabilidade. Observa-se ainda que, de acordo com os resultados obtidos, há margem para que sejam estudados novos traços a fim de se otimizar a permeabilidade e a resistência à compressão de acordo com os valores mínimos estabelecidos na NBR 16416:2015 (ABNT, 2015).

Ressalta-se aqui, ainda, o fato de que a NBR 16416:2015 (ABNT, 2015) estabelece que o pavimento intertravado permeável executado com peças de concreto permeável deve atender ao requisito mínimo de 20 MPa de resistência à compressão, enquanto o mesmo pavimento, quando executado com concreto convencional, aplicando juntas alargadas ou peças com áreas vazadas, deve atender ao mínimo de 35 MPa, para as mesmas condições de tráfego. No entanto, não fica claro os motivos para adotar dois valores para mesmo tipo de solicitação. Estima-se que seja devido à dificuldade em se obter altas resistências com o concreto permeável.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a realização do presente trabalho, foram levantadas algumas questões que podem dar origem a novos projetos, tais como:

- Avaliação da durabilidade de uma peça do paver de concreto permeável, bem como a comparação com uma peça de concreto convencional com mesma resistência;
- Avaliação do comportamento do pavimento (tanto resistência à compressão como permeabilidade) aplicado em uma área experimental, de modo que seja permitido um estudo de caso real, assim como a fabricação de concreto permeável em grande quantidade;
- Realização de traços de CPR com diferentes relações água/cimento, para avaliação de resistência e trabalhabilidade junto ao agregado graúdo;

- Avaliação da reologia do CPR para misturas com agregados graúdos, a fim de avaliar seu comportamento com esse material;
- Avaliação da cura térmica do concreto permeável.

ANEXOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Paver Permeável **Data Moldagem:** 10/01/2018
Traço: VSI 1:4,0 (CPR:Brita) **Ensaio 07 Dias:** 17/01/2018
Ensaio 28 Dias: 07/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
1	8,80	11950	18,78	0,00	18,78	
2	8,75	13260	20,84	0,00	20,84	
3	8,88	12590	19,79	0,00	19,79	
4	8,32	16540	26,00	0,00	26,00	
5	8,45	15100	23,73	0,00	23,73	
6	8,25	12640	19,87	0,00	19,87	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,57 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 2,78 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 7,73 %
Resistência Média (f_p): 21,81 MPa Resistência Característica: 19,25 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
7	8,85	12360	19,43	0,00	19,43	
8	8,74	12440	19,55	0,00	19,55	
9	8,65	12830	20,17	0,00	20,17	
10	8,70	15370	24,16	0,00	24,16	
11	8,45	16000	25,15	0,00	25,15	
12	8,40	15600	24,52	0,00	24,52	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,63 cm Coef. Correção: 1,02

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 2,71 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 7,35 %
Resistência Média (f_p): 22,51 MPa Resistência Característica: 20,02 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 07/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 17/01/2018
Traço: VSI 1:3,5 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 24/01/2018
Ensaio 28 Dias: 14/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
13	8,39	19940	31,34		0,00	31,34
14	8,38	17290	27,18		0,00	27,18
15	8,33	17170	26,99		0,00	26,99
16	8,48	12700	19,96		0,00	19,96
17	8,39	15940	25,06		0,00	25,06
18	8,51	14720	23,14		0,00	23,14

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,41 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 3,89 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 15,11 %
Resistência Média (f_p): 25,87 MPa Resistência Característica: 22,30 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
19	8,33	17270	27,15		0,00	27,15
20	8,31	20350	31,99		0,00	31,99
21	8,19	18670	29,35		0,00	29,35
22	8,27	17650	27,74		0,00	27,74
23	8,33	18060	28,39		0,00	28,39
24	8,30	17240	27,10		0,00	27,10

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,29 cm Coef. Correção: 0,93

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 5 Desvio Padrão (s): 0,94 MPa
Coeficiente de Student: 0,932 Coeficiente de Variação: 0,89 %
Resistência Média (f_p): 26,04 MPa Resistência Característica: 25,17 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 14/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 19/01/2018
Traço: VSI 1:4,5 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 26/01/2018
Ensaio 28 Dias: 16/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
25	8,29	12750	20,04	0,00	20,04	
26	8,37	13650	21,46	0,00	21,46	
27	8,31	12130	19,07	0,00	19,07	
28	8,11	11270	17,71	0,00	17,71	
29	8,19	10100	15,88	0,00	15,88	
30	8,41	11760	18,48	0,00	18,48	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,28 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,92 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 3,70 %
Resistência Média (f_p): 18,90 MPa Resistência Característica: 17,13 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
31	8,44	10310	16,21	0,00	16,21	
32	8,30	12600	19,81	0,00	19,81	
33	8,39	12070	18,97	0,00	18,97	
34	8,76	9920	15,59	0,00	15,59	
35	8,62	12510	19,66	0,00	19,66	
36	8,63	12110	19,03	0,00	19,03	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,52 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,83 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 3,36 %
Resistência Média (f_p): 18,45 MPa Resistência Característica: 16,76 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 16/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes
Material: Paver Permeável
Traço: VSI 1:3,0 (CPR:Brita)
Local de Coleta: LMC
Data Moldagem: 19/03/2018
Ensaio 07 Dias: 26/03/2018
Ensaio 28 Dias: 16/04/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
73	8,13	15370	24,16	0,00	24,16	
74	8,22	18590	29,22	0,00	29,22	
75	8,10	18500	29,08	0,00	29,08	
76	8,25	20430	32,11	0,00	32,11	
77	8,16	20040	31,50	0,00	31,50	
78	8,09	21630	34,00	0,00	34,00	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,16 cm Coef. Correção: 1,00

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6
Coeficiente de Student: 0,920
Resistência Média (f_p): 30,13 MPa
Desvio Padrão (s): 3,41 MPa
Coeficiente de Variação: 11,65 %
Resistência Característica: 26,99 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
79	8,14	22350	35,13	0,00	35,13	
80	8,11	24690	38,81	0,00	38,81	
81	8,27	23460	36,88	0,00	36,88	
82	8,20	22470	35,32	0,00	35,32	
83	8,30	23390	36,77	0,00	36,77	
84	8,27	23390	36,77	0,00	36,77	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,21 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6
Coeficiente de Student: 0,920
Resistência Média (f_p): 36,81 MPa
Desvio Padrão (s): 1,33 MPa
Coeficiente de Variação: 1,76 %
Resistência Característica: 35,58 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes
Verificado por: Wellington Fernandes
Data: 16/04/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 22/01/2018
Traço: CONV 1:4,0 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 29/01/2018
Ensaio 28 Dias: 19/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
37	8,28	10990	17,27	0,00	17,27	
38	8,32	10920	17,16	0,00	17,16	
39	8,20	11330	17,81	0,00	17,81	
40	8,15	12240	19,24	0,00	19,24	
41	8,22	12520	19,68	0,00	19,68	
42	8,20	13550	21,30	0,00	21,30	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,23 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,62 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 2,63 %
Resistência Média (f_p): 18,85 MPa Resistência Característica: 17,36 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
43	8,52	13380	21,03	0,00	21,03	
44	8,38	12080	18,99	0,00	18,99	
45	8,33	13000	20,43	0,00	20,43	
46	8,21	14780	23,23	0,00	23,23	
47	8,25	13320	20,94	0,00	20,94	
48	8,37	14640	23,01	0,00	23,01	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,34 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,61 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 2,59 %
Resistência Média (f_p): 21,45 MPa Resistência Característica: 19,97 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 19/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 24/01/2018
Traço: CONV 1:3,5 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 31/01/2018
Ensaio 28 Dias: 21/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
49	8,29	15520	24,39	0,00	24,39	
50	8,30	16870	26,52	0,00	26,52	
51	8,36	15690	24,66	0,00	24,66	
52	8,31	14210	22,34	0,00	22,34	
53	8,46	15200	23,89	0,00	23,89	
54	8,32	14180	22,29	0,00	22,29	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,34 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,59 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 2,53 %
Resistência Média (f_p): 24,22 MPa Resistência Característica: 22,76 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
55	8,30	19610	30,82	0,00	30,82	
56	8,33	20810	32,71	0,00	32,71	
57	8,37	23180	36,44	0,00	36,44	
58	8,31	21390	33,62	0,00	33,62	
59	8,40	17130	26,93	0,00	26,93	
60	8,29	17340	27,26	0,00	27,26	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,33 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 3,73 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 13,89 %
Resistência Média (f_p): 31,55 MPa Resistência Característica: 28,12 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 21/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 26/01/2018
Traço: CONV 1:4,5 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 02/02/2018
Ensaio 28 Dias: 23/02/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
61	8,31	12870	20,23		0,00	20,23
62	8,35	13100	20,59		0,00	20,59
63	8,28	13050	20,51		0,00	20,51
64	8,48	12230	19,22		0,00	19,22
65	8,57	11880	18,67		0,00	18,67
66	8,44	12060	18,96		0,00	18,96

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,41 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 0,84 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 0,71 %
Resistência Média (f_p): 19,90 MPa Resistência Característica: 19,12 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
67	8,36	12830	20,17		0,00	20,17
68	8,43	13100	20,59		0,00	20,59
69	8,33	15260	23,99		0,00	23,99
70	8,35	13640	21,44		0,00	21,44
71	8,29	14120	22,19		0,00	22,19
72	8,37	14090	22,15		0,00	22,15

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,35 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,36 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 1,86 %
Resistência Média (f_p): 21,95 MPa Resistência Característica: 20,69 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 23/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Emilio Hilarino Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Paver Permeável Data Moldagem: 26/03/2018
Traço: CONV 1:3:0 (CPR:Brita) Ensaio 07 Dias: 02/04/2018
Ensaio 28 Dias: 23/04/2018

Ensaio de Compressão 07 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
85	8,18	22970	36,10	0,00	36,10	
86	8,30	21370	33,59	0,00	33,59	
87	8,21	22520	35,40	0,00	35,40	
88	8,28	23240	36,53	0,00	36,53	
89	8,18	22220	34,93	0,00	34,93	
90	8,73	21570	33,90	0,00	33,90	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,31 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 1,17 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 1,38 %
Resistência Média (f_p): 35,35 MPa Resistência Característica: 34,27 MPa

Ensaio de Compressão 28 Dias

Exemplar Nº	Altura (cm)	Corpo de Prova A		Corpo de Prova B		Tensão (MPa)
		Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	
91	8,18	22320	35,08	0,00	35,08	
92	8,11	24670	38,78	0,00	38,78	
93	8,34	23110	36,33	0,00	36,33	
94	8,18	24460	38,45	0,00	38,45	
95	8,35	25770	40,51	0,00	40,51	
96	8,21	25440	39,99	0,00	39,99	

Área de Carregamento: 63,62 cm² Altura Média: 8,23 cm Coef. Correção: 1,01

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 Desvio Padrão (s): 2,10 MPa
Coeficiente de Student: 0,920 Coeficiente de Variação: 4,43 %
Resistência Média (f_p): 38,40 MPa Resistência Característica: 36,47 MPa

Especificação

Conclusão

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 23/04/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes	Local de Coleta: LMC
Material: Testemunho Paver Permeável	Data Moldagem: 10/01/2018
Traço: VSI 1:4,0 (CPR:Brita)	Ensaio 28 Dias: 07/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm²	Área Tubo cm²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
1	0,092	34	13,81	9,24	67,06	78,54	11,10	0,00636862	6,06E-03
							11,97	0,00590574	
							11,97	0,00590574	
2	0,090	34	14,03	9,23	66,91	78,54	11,10	0,00609391	5,82E-03
							11,91	0,00567946	
							11,92	0,00567470	
3	0,087	34	14,30	9,17	65,97	78,54	11,84	0,00534566	5,36E-03
							11,78	0,00537288	
							11,81	0,00535924	
4	0,092	34	13,80	9,20	66,48	78,54	10,64	0,00659903	6,72E-03
							10,35	0,00678393	
							10,38	0,00676432	
5	0,086	34	14,36	9,25	67,13	78,54	9,30	0,00684398	6,86E-03
							9,34	0,00681467	
							9,21	0,00691086	
6	0,091	34	13,95	9,23	66,84	78,54	11,73	0,00584929	5,85E-03
							11,74	0,00584431	
							11,71	0,00585928	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un
 Média: 6,11E-03 m/s
 Desvio Padrão (s): 5,73E-04 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	M _{ss} g	M _i g	M _s g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm³	M. Esp. SSS g/cm³	M _{esp Real} g/cm³
1	1219	742	1193	26,814	2,179	2,501	2,556	2,645
2	1177	719	1155	27,356	1,905	2,522	2,570	2,649
3	1155	704	1134	25,081	1,852	2,514	2,561	2,637
4	1197	731	1174	27,565	1,959	2,519	2,569	2,650
5	1124	685	1103	27,929	1,904	2,513	2,560	2,639
6	1217	744	1195	25,440	1,841	2,526	2,573	2,650
Média				26,674	1,892	2,516	2,565	2,645

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes
 Verificado por: Wellington Fernandes
 Data: 07/02/2018
 Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes Local de Coleta: LMC
Material: Testemunho Paver Permeável Data Moldagem: 17/01/2018
Traço: VSI 1:3,5 (CPR:Brita) Ensaio 28 Dias: 14/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm ²	Área Tubo cm ²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
7	0,092	34	13,78	9,25	67,20	78,54	13,17	0,00540984	5,41E-03
							13,14	0,00542220	
							13,19	0,00540164	
8	0,091	34	13,87	9,22	66,77	78,54	14,81	0,00469885	4,58E-03
							15,94	0,00436575	
							14,88	0,00467675	
9	0,088	34	14,25	9,23	66,91	78,54	15,95	0,00406417	4,17E-03
							14,83	0,00437111	
							15,94	0,00406672	
10	0,088	34	14,20	9,21	66,62	78,54	16,41	0,00397161	3,98E-03
							16,36	0,00398375	
							16,41	0,00397161	
11	0,091	34	13,94	9,21	66,62	78,54	19,71	0,00347640	3,46E-03
							19,80	0,00346060	
							19,84	0,00345362	
12	0,086	34	14,37	9,22	66,77	78,54	14,67	0,00430681	4,33E-03
							14,48	0,00436332	
							14,58	0,00433339	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 6,53E-04 m/s
Média: 4,32E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm ³	M. Esp. g/cm ³	Mesp Real g/cm ³
7	1240	755	1213	26,080	2,226	2,501	2,557	2,648
8	1252	761	1225	23,881	2,204	2,495	2,550	2,640
9	1193	726	1170	24,163	1,966	2,505	2,555	2,635
10	1215	736	1192	22,219	1,930	2,489	2,537	2,614
11	1170	709	1147	27,433	2,005	2,488	2,538	2,619
12	1241	753	1217	19,470	1,972	2,494	2,543	2,623
Média				23,874	2,050	2,495	2,546	2,630

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 14/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 19/01/2018
Traço: VSI 1:4,5 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 16/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm ²	Área Tubo cm ²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
13	0,087	34	14,31	9,22	66,77	78,54	9,63	0,00663855	6,66E-03
							9,64	0,00663166	
							9,52	0,00671526	
14	0,085	34	14,49	9,23	66,84	78,54	10,56	0,00584921	5,80E-03
							10,71	0,00576729	
							10,67	0,00578891	
15	0,088	34	14,25	9,25	67,13	78,54	8,90	0,00730724	7,34E-03
							8,78	0,00740711	
							8,90	0,00730724	
16	0,091	34	13,92	9,25	67,20	78,54	10,43	0,00665201	6,61E-03
							10,46	0,00663293	
							10,60	0,00654533	
17	0,090	34	14,01	9,24	66,98	78,54	9,55	0,00711791	7,11E-03
							9,60	0,00708084	
							9,53	0,00713285	
18	0,082	34	14,84	9,20	66,40	78,54	9,20	0,00621696	6,17E-03
							9,33	0,00613034	
							9,30	0,00615011	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 5,72E-04 m/s
Média: 6,62E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp Sat. g/cm ³	M. Esp. g/cm ³	Mesp Real g/cm ³
13	1128	685	1104	27,782	2,174	2,492	2,546	2,635
14	1133	688	1110	25,807	2,072	2,494	2,546	2,630
15	1148	697	1125	27,133	2,044	2,494	2,545	2,629
16	1195	726	1171	27,071	2,050	2,497	2,548	2,631
17	1182	719	1158	27,098	2,073	2,501	2,553	2,638
18	1091	663	1069	25,072	2,058	2,498	2,549	2,633
Média				26,661	2,059	2,496	2,547	2,633

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 16/02/2018
Folha: 01/01



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 19/03/2018
Traço: VSI 1:3,0 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 16/04/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm²	Área Tubo cm²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
37	0,096	34	13,41	9,24	66,98	78,54	40,48	0,00187976	1,89E-03
							40,51	0,00187837	
							39,53	0,00192494	
38	0,094	34	13,58	9,12	65,25	78,54	48,35	0,00148559	1,54E-03
							45,89	0,00156522	
							45,98	0,00156216	
39	0,093	34	13,75	9,26	67,35	78,54	25,80	0,00278322	2,76E-03
							26,13	0,00274807	
							26,20	0,00274072	
40	0,092	34	13,76	9,25	67,20	78,54	21,88	0,00326860	3,22E-03
							22,94	0,00311757	
							21,91	0,00326413	
41	0,094	34	13,63	9,24	67,06	78,54	23,84	0,00306736	3,07E-03
							23,78	0,00307510	
							23,83	0,00306865	
42	0,095	34	13,54	9,26	67,27	78,54	35,88	0,00207929	2,09E-03
							35,66	0,00209212	
							35,77	0,00208569	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 6,84E-04 m/s
Média: 2,43E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp Sat. g/cm³	M. Esp. g/cm³	Mesp Real g/cm³
37	1378	833	1350	19,516	2,074	2,477	2,528	2,611
38	1339	810	1314	18,007	1,903	2,484	2,531	2,607
39	1301	790	1276	21,984	1,959	2,497	2,546	2,626
40	1298	785	1274	21,248	1,884	2,483	2,530	2,605
41	1333	810	1308	20,740	1,911	2,501	2,549	2,627
42	1334	800	1309	20,020	1,910	2,451	2,498	2,572
Média				20,252	1,940	2,488	2,537	2,615

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 16/04/2018
Folha: 01/01



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 22/01/2018
Traço: CONV 1:4,0 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 19/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm ²	Área Tubo cm ²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
19	0,089	34	14,10	9,15	65,68	78,54	9,94	0,00659091	6,40E-03
							9,88	0,00663094	
							10,95	0,00598298	
20	0,088	34	14,24	9,23	66,91	78,54	9,80	0,00662755	6,60E-03
							9,85	0,00659391	
							9,87	0,00658055	
21	0,083	34	14,66	9,21	66,55	78,54	9,16	0,00648988	6,31E-03
							9,59	0,00619889	
							9,54	0,00623138	
22	0,091	34	13,86	9,23	66,91	78,54	10,63	0,00657325	6,56E-03
							10,63	0,00657325	
							10,69	0,00653635	
23	0,086	34	14,39	9,25	67,20	78,54	12,81	0,00494480	5,31E-03
							11,51	0,00550329	
							11,56	0,00547949	
24	0,090	34	13,98	9,24	66,98	78,54	10,37	0,00659284	6,61E-03
							10,27	0,00665704	
							10,37	0,00659284	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 5 un **Desvio Padrão (s):** 1,36E-04 m/s
Média: 6,50E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm ³	M. Esp. g/cm ³	Mesp Real g/cm ³
19	1142	694	1120	27,128	1,964	2,500	2,549	2,629
20	1139	691	1117	27,320	1,970	2,493	2,542	2,622
21	1097	663	1074	25,948	2,142	2,475	2,528	2,613
22	1192	723	1169	27,072	1,967	2,493	2,542	2,621
23	1149	696	1127	25,510	1,952	2,488	2,536	2,615
24	1180	718	1156	27,506	2,076	2,502	2,554	2,639
Média				26,747	2,012	2,495	2,542	2,623

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 19/02/2018
 Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 24/01/2018
Traço: CONV 1:3,5 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 21/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm²	Área Tubo cm²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
25	0,095	34	13,51	9,11	65,11	78,54	12,94	0,00561126	5,96E-03
							11,88	0,00611193	
26	0,096	34	13,41	9,24	66,98	78,54	11,79	0,00615859	6,66E-03
							11,46	0,00663986	
27	0,095	34	13,50	9,25	67,13	78,54	11,36	0,00669831	7,10E-03
							11,45	0,00664566	
28	0,094	34	13,59	9,23	66,91	78,54	10,04	0,00747001	6,71E-03
							10,81	0,00693792	
29	0,097	34	13,27	9,22	66,69	78,54	10,86	0,00690597	7,47E-03
							10,95	0,00671368	
30	0,095	34	13,53	9,25	67,20	78,54	10,92	0,00673213	6,62E-03
							10,98	0,00669534	
							10,16	0,00765125	
							10,13	0,00767391	
							10,99	0,00707340	
							11,98	0,00623231	
							10,79	0,00691965	
							11,13	0,00670827	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 5,08E-04 m/s
Média: 6,75E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm³	M. Esp. g/cm³	Mesp Real g/cm³
25	1288	783	1266	21,832	1,738	2,507	2,550	2,621
26	1275	774	1250	25,899	2,000	2,495	2,545	2,626
27	1281	778	1257	24,888	1,909	2,499	2,547	2,624
28	1247	759	1225	25,988	1,796	2,510	2,555	2,629
29	1270	772	1247	26,802	1,844	2,504	2,550	2,625
30	1255	763	1232	26,303	1,867	2,504	2,551	2,627
Média				25,976	1,859	2,503	2,550	2,625

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 21/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 26/01/2018
Traço: CONV 1:4,5 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 23/02/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP Nº	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm²	Área Tubo cm²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
31	0,088	34	14,16	9,17	65,97	78,54	8,10	0,00802983	7,85E-03
							8,44	0,00770635	
							8,33	0,00780812	
32	0,092	34	13,83	9,23	66,91	78,54	8,37	0,00839573	8,36E-03
							8,49	0,00827706	
							8,36	0,00840577	
33	0,091	34	13,88	9,11	65,18	78,54	8,67	0,00782128	7,91E-03
							8,50	0,00797770	
							8,54	0,00794034	
34	0,088	34	14,24	9,25	67,13	78,54	9,21	0,00707506	7,03E-03
							9,28	0,00702169	
							9,33	0,00698406	
35	0,088	34	14,25	9,20	66,40	78,54	8,49	0,00757749	7,59E-03
							8,54	0,00753312	
							8,39	0,00766780	
36	0,093	34	13,72	9,22	66,69	78,54	8,74	0,00818232	8,14E-03
							8,85	0,00808062	
							8,77	0,00815433	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 4,65E-04 m/s
Média: 7,81E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP Nº	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm³	M. Esp. g/cm³	Mesp Real g/cm³
31	1137	692	1116	27,296	1,882	2,508	2,555	2,632
32	1187	724	1168	27,636	1,627	2,523	2,564	2,631
33	1165	710	1143	27,161	1,925	2,512	2,560	2,640
34	1123	685	1104	28,746	1,721	2,521	2,564	2,635
35	1130	689	1111	27,371	1,710	2,519	2,562	2,633
36	1195	730	1174	28,261	1,789	2,525	2,570	2,644
Média				27,745	1,776	2,518	2,563	2,636

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 23/02/2018
Folha: 01/01



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ensaio de Peças de Concreto Para Pavimentação

Informações Gerais

Interessado: Wellington Fernandes **Local de Coleta:** LMC
Material: Testemunho Paver Permeável **Data Moldagem:** 26/03/2018
Traço: CONV 1:3,0 (CPR:Brita) **Ensaio 28 Dias:** 23/04/2018

Ensaio de Permeabilidade

CP N°	H CP m	Hi cm	Hf cm	Dm cm	Área CP cm²	Área Tubo cm²	Tempo de Queda s	Coef. Permeabilidade	
								Individual (m/s)	Médio (m/s)
43	0,095	34	13,46	9,23	66,91	78,54	28,31	0,00266025	2,66E-03
							28,33	0,00265837	
							28,26	0,00266495	
44	0,095	34	13,55	9,25	67,13	78,54	36,43	0,00203968	2,03E-03
							37,37	0,00198837	
							36,28	0,00204811	
45	0,094	34	13,65	9,24	67,06	78,54	49,38	0,00147535	1,48E-03
							49,33	0,00147684	
							49,37	0,00147565	
46	0,093	34	13,67	9,25	67,20	78,54	83,60	0,00087007	8,64E-04
							83,98	0,00086613	
							84,99	0,00085584	
47	0,095	34	13,49	9,26	67,27	78,54	73,84	0,00101978	1,02E-03
							73,98	0,00101785	
							73,48	0,00102478	
48	0,094	34	13,57	9,23	66,91	78,54	33,31	0,00221523	2,21E-03
							33,38	0,00221059	
							33,29	0,00221656	

Parâmetros estatísticos da Amostra

Número de Exemplares: 6 un Desvio Padrão (s): 7,08E-04 m/s
Média: 1,71E-03 m/s

Massa Específica e Porosidade

CP N°	Msss g	Mi g	Ms g	Porosidade %	Absorção %	M. Esp S. g/cm³	M. Esp. g/cm³	Mesp Real g/cm³
43	1336	808	1310	21,357	1,985	2,481	2,530	2,610
44	1327	797	1300	20,707	2,077	2,453	2,504	2,584
45	1319	794	1292	20,570	2,090	2,461	2,512	2,594
46	1336	802	1309	19,136	2,063	2,451	2,502	2,582
47	1364	819	1336	19,190	2,096	2,451	2,503	2,584
48	1335	803	1309	19,805	1,986	2,461	2,509	2,587
Média				20,128	2,049	2,455	2,506	2,586

Observações

Preparado por: Wellington Fernandes Verificado por: Wellington Fernandes Data: 23/04/2018
Folha: 01/01