



Universidade Federal do Espírito Santo

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação das propriedades mecânicas
e permeáveis de pavers drenantes
contendo resíduos provenientes do
corte de rochas ornamentais**

OTÁVIO GAIGHER SIMÕES

Vitória/ES

Fevereiro, 2023

OTÁVIO GAIGHER SIMÕES

Avaliação das propriedades mecânicas e permeáveis de pavers drenantes contendo resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr^a Rudiele A. Schankoski

Vitória/ES

Fevereiro, 2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S593a Simões, Otávio Gaigher, 1992-
Avaliação das propriedades mecânicas e permeáveis de
pavers drenantes contendo resíduos provenientes do corte de
rochas ornamentais. / Otávio Gaigher Simões. - 2023.
100 f. : il.

Orientadora: Rudiele Aparecida Schankoski.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Blocos de concreto. 2. Reaproveitamento. 3. Resíduos
como material de construção. 4. Rochas ornamentais. 5. Granito.
6. Mármore. I. Schankoski, Rudiele Aparecida. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEÁVEIS DE PAVERS DRENANTES CONTENDO RESÍDUOS PROVENIENTES DO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Otávio Gaigher Simões

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **23 de fevereiro de 2023** por:

Profa. Dra. Rudiele Aparecida Schankoski

Doutora em Engenharia Civil

Orientadora – UFES

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira

Doutora em Engenharia Civil

Examinadora Interna – UFES

Profa. Dra. Lidiane Fernanda Jochem

Doutora em Engenharia Civil

Examinadora Externa - UTFPR

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo à minha querida orientadora, Rudiele Schankoski. Você me acolheu como seu orientando e me ensinou a pesquisar. Diversas foram as nossas conversas e você me guiou com todo seu carinho e conhecimento. Eu fui moldado por ti e por toda minha carreira acadêmica eu lhe serei grato.

Agradeço a todos os professores que passaram pela minha formação, em especial ao professor Ronaldo Pilar, que esteve de perto me orientando mesmo que de forma indireta. Às professoras Geilma, Maristela, Jamilla e Lidiane, e ao professor João Luiz Calmon.

À amiga que o mestrado me deu, Luciana. Formamos dupla em todas as disciplinas semestrais e estou certo que tudo seria mais difícil sem você. Aos colegas Luis, Mayara e Júlia, que muito ajudaram a desenvolver a minha pesquisa.

Aos técnicos Breno, Luana e Márcio do LEMAC (Laboratório de Materiais de Construção) que tiveram uma contribuição fundamental para o desenvolvimento do meu trabalho, auxiliando com muitos dos meus ensaios.

Ao Flávio e ao Tadeu, técnicos do LUCCAR (Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins) por me ajudarem com ensaios de microscopia, além das técnicas Flávia e Lívia do Laboratório de Sedimentologia, pelo ensaio de granulometria a laser. Foram ensaios realizados de última hora, e sem o esforço de vocês, eles não seriam possíveis.

Agradeço à ADAMAG (Associação de Desenvolvimento Ambiental do Mármore e Granito) e também ao Nilson Vagner da Magnitos Magnago, pelo fornecimento dos resíduos de mármore e granito.

Agradeço à FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo) pelo apoio financeiro em parte da minha pesquisa. E também à Cidade Engenharia por fomentar o projeto disponibilizando materiais e maquinário para a fabricação dos meus pavers.

Agradeço finalmente então à minha família, minha mãe, meu pai e minha irmã. Eu comecei minha trajetória na pós-graduação em meio à uma pandemia e sem apoio financeiro. Foi difícil, mas em meio às dificuldades, vocês foram meu porto seguro.

À minha amada esposa, por todo amor e carinho. Obrigado por estar sempre disposta a me ajudar e ouvir, mesmo que reclamando por ter que peneirar meia tonelada de resíduo de rocha. Você sem dúvida foi minha maior inspiração.

O meu muito obrigado de maneira geral, tive o privilégio de trabalhar com todos que tornaram esse sonho possível. Sem vocês, a maravilha disso tudo não teria me acontecido.

“Devemos lutar para que todo homem e toda mulher tenham a oportunidade de viver vidas seguras e saudáveis, repletas de oportunidades e amor. Somos todos viajantes do tempo em uma jornada rumo ao amanhã. E vamos trabalhar juntos na construção desse futuro, um lugar que queremos visitar. Seja corajoso, seja curioso, seja determinado, supere as probabilidades. É possível.”

Stephen Hawking (2018)

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 2. OBJETIVOS..... | 22 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 22 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 22 |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA..... | 23 |
| 3.1. Resíduos | 23 |
| 3.2. Indústrias de Rochas Ornamentais | 23 |
| 3.3. Resíduos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) em Misturas Cimentícias..... | 26 |
| 3.4. Materiais Cimentícios Suplementares | 28 |
| 3.5. Propriedade de Materiais Cimentícios Suplementares..... | 30 |
| 3.5.1. Mineralogia..... | 31 |
| 3.5.2. Finura | 33 |
| 3.5.3. Morfologia das Partículas..... | 34 |
| 3.5.4. Influência de finos na hidratação..... | 37 |
| 3.5.5. Ensaio de Caracterização dos finos | 39 |
| 3.5.5.1. D.R.X. | 39 |
| 3.5.5.2. M.E.V. | 41 |
| 3.5.5.3. Adsorção por Azul de Metileno | 42 |
| 3.6. Concreto Permeável..... | 42 |
| 3.6.1. Definição | 42 |
| 3.6.2. Características | 44 |
| 3.6.3. Dosagem - Materiais e caracterizações | 46 |
| 3.7. Fabricação de peças de concreto para pavimentação – pavers..... | 51 |
| 3.7.1. Vibro prensa hidráulica..... | 51 |
| 4. ABORDAGEM METODOLÓGICA | 56 |

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| 4.1. Materiais..... | 56 |
| 4.2. Estudo piloto..... | 57 |
| 4.3. Proporcionamento das misturas..... | 59 |
| 4.4. Métodos..... | 60 |
| 4.4.1. Ensaio..... | 61 |
| 4.4.1.1. Massa específica aparente..... | 62 |
| 4.4.1.2. Porosidade..... | 62 |
| 4.4.1.3. Permeabilidade..... | 63 |
| 4.4.1.4. Resistência à abrasão..... | 66 |
| 4.4.1.5. Resistência à Compressão..... | 69 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 70 |
| 5.1. Caracterização dos resíduos..... | 70 |
| 5.1.1. Massa específica aparente..... | 70 |
| 5.1.2. Área superficial pelo método de Blaine..... | 70 |
| 5.1.3. Granulometria a laser..... | 70 |
| 5.1.4. Difração de raios X..... | 71 |
| 5.1.5. Microscopia eletrônica de varredura..... | 73 |
| 5.1.6. Adsorção de azul de metileno..... | 74 |
| 5.2. Estado fresco..... | 75 |
| 5.3. Massa específica aparente..... | 76 |
| 5.4. Porosidade x Permeabilidade..... | 78 |
| 5.5. Resistência à Abrasão..... | 81 |
| 5.6. Resistência à compressão..... | 85 |
| 5.7. Consumo de cimento..... | 88 |
| 5.8. Análise de variância (ANOVA)..... | 90 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 91 |
| 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS..... | 93 |

| | |
|----------------------|----|
| 8. REFERÊNCIAS | 94 |
|----------------------|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Comparação entre paver comum e paver permeável. | 20 |
| Figura 2 – Pedreira de calcário em Cachoeiro de Itapemirim (ES), 1958. | 24 |
| Figura 3: Processo de desdobramento por meio de tear multi-fios. | 25 |
| Figura 4 - Resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais. | 26 |
| Figura 5: Partículas arredondadas, mas com diferentes angularidades e texturas. ... | 35 |
| Figura 6 - Imagens MEV de partículas de calcário (a) e de quartzo (b). | 36 |
| Figura 7 - Picos de partículas de quartzo encontradas em resíduos de mármore após tratamento térmico por DRX. | 40 |
| Figura 8 - MEV: Fíler calcário x silicosos. | 41 |
| Figura 9: Seção transversal de um sistema de drenagem composto por concreto permeável. | 43 |
| Figura 10: Mistura de concreto permeável no estado fresco. | 49 |
| Figura 11: Máquina de vibro prensa. | 52 |
| Figura 12: Gaveta recebendo o material do silo de armazenamento e destinando à forma. | 53 |
| Figura 13: Partes constituintes de uma vibro presa. | 53 |
| Figura 14: Sapata, gaveta e forma de uma vibro prensa. | 55 |
| Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados. | 57 |
| Figura 16: CP confeccionado com traço piloto, com baixa permeabilidade. | 58 |
| Figura 17: Ponto de pelota. | 59 |
| Figura 18: Fluxograma das misturas produzidas. | 60 |
| Figura 19: Vibro-prensas "multicamadas" EVO. | 61 |
| Figura 20: Variáveis de resposta. | 62 |
| Figura 21: Execução do ensaio de porosidade com silicone acético. | 63 |
| Figura 22: Agregado graúdo utilizado para o sistema simulador de drenagem. | 64 |
| Figura 23: Sistema simulador de drenagem concluído. | 64 |
| Figura 24: Anel cilíndrico para a execução do ensaio de permeabilidade. | 65 |
| Figura 25: Abrasímetro Amsler modelo 100M063. | 66 |
| Figura 26: Esquema de corte dos pavers. | 67 |
| Figura 27: Corpo de prova utilizado para o teste de abrasão. | 67 |
| Figura 28: Pontos de medição há 30,0 milímetros dos vértices. | 68 |
| Figura 29: Medidor com o gabarito construído. | 68 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30: Ensaio de resistência à compressão..... | 69 |
| Figura 31: Distribuição granulométrica dos RBRO-G e RBRO-M. | 71 |
| Figura 32: Difratoograma do RBRO-G. | 72 |
| Figura 33: Difratoograma do RBRO-M. | 72 |
| Figura 34: Imagem de MEV do RBRO-G. | 73 |
| Figura 35: Imagem de MEV do RBRO-M. | 73 |
| Figura 36: Ensaio de azul de metileno - solução com 5g/L..... | 74 |
| Figura 37: Azul de metileno no RBRO-G. | 75 |
| Figura 38: Azul de metileno no RBRO-M. | 75 |
| Figura 39: Paver fabricado com 10 segundos de vibrocompressão..... | 77 |
| Figura 40: Paver 15% RBRO-M fabricado com 14 segundos de vibrocompressão. . | 77 |
| Figura 41: Permeabilidade e porosidade dos pavers incorporados com RBRO-G e RBRO-M..... | 78 |
| Figura 42: Abrasão dos pavers incorporados com RBRO-G e RBRO-M. | 82 |
| Figura 43: Regressão linear entre os resultados de porosidade e desgaste..... | 83 |
| Figura 44: Diferentes níveis de abrasão apresentados para diferentes volumes de porosidade dos pavers contendo resíduo de granito. | 83 |
| Figura 45: Resistência à compressão com 7 e 28 dias (RBRO-G). | 85 |
| Figura 46: Resistência à compressão com 7 e 28 dias (RBRO-M). | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Proporcionamento dos componentes do concreto permeável..... | 46 |
| Tabela 2: Proporções do concreto permeável e seus componentes típicos. | 48 |
| Tabela 3: Dosagem de concreto permeável adaptados da ACI 522 - R10. | 49 |
| Tabela 4: Laudo do cimento utilizado para as misturas. | 56 |
| Tabela 5: Traço inicial (descartado) para 1,0 m ³ de concreto. | 58 |
| Tabela 6: Proporcionamento das misturas para a produção 1 m ³ de concreto. | 60 |
| Tabela 7: Massa específica aparente dos pavers incorporados com RBRO-G. | 76 |
| Tabela 8: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para porosidade e permeabilidade das misturas com RBRO-G..... | 80 |
| Tabela 9: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para porosidade e permeabilidade das misturas com RBRO-M..... | 81 |
| Tabela 10: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à abrasão para RBRO-G..... | 84 |
| Tabela 11: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à abrasão para RBRO-M..... | 84 |
| Tabela 12: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias para RBRO-G. ... | 87 |
| Tabela 13: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias para RBRO-M. ... | 87 |
| Tabela 14: Comparação entre médias com os dois resíduos..... | 88 |
| Tabela 15: Modelo estatístico utilizado para correlacionar e corrigir os concretos com diferentes porosidades. | 89 |
| Tabela 16: Índice de cimento dos concretos drenantes confeccionados com RBRO-G. | 89 |
| Tabela 17: ANOVA - influência do teor e da mineralogia do RBRO na porosidade, permeabilidade, abrasão e resistência à compressão dos pavers. | 90 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|----------------------------------|----|
| Equação (1) – Lei de Darcy | 65 |
|----------------------------------|----|

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ADAMAG: Associação do desenvolvimento sustentável do mármore e granito.

ANOVA: Análise de Variância

COD: *Crystallography Open Database*.

CP: Corpo de prova.

DRX: Difração por raios-X.

MEV: Microscopia eletrônica de varredura.

MPa: Mega Pascal

ODS: Objetivos de desenvolvimento sustentável.

RBRO: Resíduo do beneficiamento de rocha ornamental.

RBRO-G: Resíduo do beneficiamento de rocha ornamental, tipo granito.

RBRO-M: Resíduo do beneficiamento de rocha ornamental, tipo mármore.

RESUMO

Estima-se que cerca de 2,4 milhões de toneladas de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) são geradas anualmente no Brasil, sendo, em sua maioria, destinados à aterros, formando um preocupante passivo ambiental. A fim de contribuir em soluções que minimizem o seu descarte e ainda agregar valor técnico a esse material, é proposto o uso desses resíduos para produção de pavimentos permeáveis. Para tanto, foram produzidos concretos drenantes (pavers), contendo teores de 0, 5, 10 e 15% de resíduo de granito ou mármore em substituição volumétrica de cimento Portland. Ensaios de porosidade, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à abrasão foram conduzidos, baseando-se nas prescrições normativas vigentes. Os resultados de resistência à compressão das peças incorporadas com 5% e 10% de resíduo proveniente de rocha granítica (RBRO-G), obtiveram resistência característica acima da mínima exigida pela norma (20MPa), com 20,6 e 20,1 MPa respectivamente, enquanto as peças com 15% de substituição não obtiveram um resultado satisfatório (16,3 MPa). Para os pavers com resíduos de mármore (RBRO-M), as peças com 5% e 10% não apresentaram resistência mínima exigida pela norma vigente, com resultados de 15,0 e 16,6 MPa, enquanto que o paver com 15% foi o mais resistente de todos os traços (34,4 MPa). Os resultados de porosidade e permeabilidade para as peças com RBRO-G foram satisfatórios, com resultados acima de 16,6% e 5.000 milímetros por hora, respectivamente para todas as misturas testadas. Para os pavers confeccionados com resíduos de mármore (RBRO-M), os resultados de porosidade e permeabilidade atenderam as condições mínimas normativas (15 a 30% e 3.600 mm/h), nas misturas com teores de 5% e 10% de resíduo, com valores de acima de 19% e 6.000 mm/h. Por outro lado, o paver com 15% de substituição de cimento por resíduo não apresentou porosidade e permeabilidade adequadas, tornando-o ineficaz nestes quesitos. Para a resistência à abrasão, as peças tiveram maior desgaste, em função do aumento da porosidade. As misturas com 5, 10 e 15% de RBRO-G tiveram desgastes de 0,794, 0,875 e 0,947 milímetros, respectivamente, e as misturas com 5 e 10% de RBRO-M tiveram desgastes de 1,079 e 0,751 milímetros respectivamente, sendo que a mistura com 15% de RBRO-M foi excluída das análises. Ambas as misturas contendo os granito e mármore, tiveram maior

desgaste em comparação à mistura referência.

Palavras-chaves: *Paver, concreto permeável, drenante, resíduo de rochas ornamentais, granito, mármore.*

ABSTRACT

Large amounts of ornamental stone waste (OSW) are generated annually in Brazil, a volume of 2.4 million tons is measured, most of which are destined for landfills, forming a worrying environmental liability. In order to contribute to solutions that minimize its disposal and also add technical value to this material, the use of these residues for the production of permeable pavements is proposed. For this purpose, draining concrete was produced, containing 0, 5, 10 and 15% of granite or marble contents replacing Portland cement. Porosity, permeability, compressive strength and abrasion resistance tests were conducted, based on current normative prescriptions. The compressive strength results of the parts incorporated with 5% and 10% of waste from granitic rock (OSW-G), obtained characteristic strength above the minimum required by the standard (20MPa), with 20.6 and 20.1 MPa respectively, while parts with 15% replacement did not obtain a satisfactory result (16.3 MPa). For pavers with marble waste (OSW-M), the pieces with 5% and 10% did not show the minimum resistance required by the current standard, with results of 15.0 and 16.6 MPa, while the paver with 15% was the most resistant of all the mixes (34.4 MPa). The porosity and permeability results for the parts with OSW-G were satisfactory, with results above 16.6% and 5,000 millimeters per hour, respectively, for all tested mixtures. For the pavers made with marble waste (OSW-M), the porosity and permeability results met the minimum normative conditions (15 to 30% and 3,600 mm/h), in mixtures with 5% and 10% residue contents, with values above 19% and 6,000 mm/h. On the other hand, the paver with 15% replacement of cement by residue did not show adequate porosity and permeability, making it ineffective in these aspects. For abrasion resistance, the pieces had more wear, due to the increase in porosity. The mixtures with 5, 10 and 15% of RBRO-G had wear of 0,794, 0,875 and 0,947 millimeters respectively, and the mixtures with 5 and 10% of RBRO-M had wear of 1,079 and 0,751 millimeters respectively, and the mixture with 15% of RBRO-M was excluded from the analyses. Both mixtures containing granite and marble had greater wear compared to the reference mixture.

Keywords: *Permeable paver, permeable, ornamental stone wastes, granite, marble.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa o quinto lugar mundial na produção de lavra e exportação de rochas processadas, com uma produção de 8 milhões de toneladas em 2018 (MONTANI, 2019). O estado do Espírito Santo é o maior extrator e fornecedor de rochas ornamentais do Brasil, contribuindo com 56% da produção nacional. Além de conter a maior reserva de mármore do país, é também um grande produtor de granito. Estima-se que os resíduos provenientes de rochas ornamentais podem chegar a 30% do bloco após a fase de corte (VAZZOLER et al., 2018).

Na grande maioria dos casos, as empresas que geram os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) encontram pouco ou nenhum destino para utilização destes materiais, sendo grande parte do volume gerado depositado em pátios e aterros, formando um passivo ambiental. O seu descarte é problemático, o seu armazenamento gera custos e o material pode contaminar o ar e a água devido à sua natureza extremamente fina (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). Dessa forma, buscar soluções de reutilização deste subproduto possui importância ambiental, econômica e operacional. No que se refere aos materiais cimentícios convencionais (pastas, argamassas e concretos), pesquisas na área têm mostrado que o uso de RBRO na composição de misturas apresentam resultados promissores (CALMON et al., 2007; BACARJI et al., 2013; AREL, 2016; VAZZOLER et al., 2018).

Dentro do contexto de sustentabilidade, buscando materiais alternativos que minimizem problemas ambientais devido ao crescimento das cidades, um tipo de concreto vem se destacando como alternativa, denominado concreto permeável. Usado em pavimentação seja na forma de blocos, conhecidos como pavers, ou como revestimento contínuo, essa solução apresenta algumas vantagens que colaboram para a proteção do meio ambiente nos centros urbanos (YANG; JIANG, 2003; IBRAHIM et al 2014), tais como: possibilidade de infiltração das águas pluviais rapidamente para o solo, de modo que os recursos hídricos subterrâneos possam ser renovados, além de ser uma estratégia para o gerenciamento do escoamento de água pluviais; diminuição nos ruídos de veículos, devido a capacidade do concreto permeável de absorve-los, o que cria um ambiente confortável ao usuário das vias do ponto de vista funcional; diminuição de derrapagem de veículos em dias chuvosos, aumentando a segurança viária; absorção de poluentes e filtragem de

sólidos em suspensão, melhorando a qualidade do ar; e conforto térmico, pois os poros do concreto permeável podem ajustar a temperatura e a umidade do ambiente, diminuindo o fenômeno de ilha de calor.

Por outro lado, o paver de concreto permeável ainda precisa ser melhor estudado em relação ao seu desempenho mecânico, já que sua elevada porosidade, com poros conectados, pode afetar significativamente sua resistência e, conseqüentemente, diminuir a vida útil do pavimento, quando comparado com àquele fabricado com concreto convencional (CROUCH et al., 2006). A Figura 1 apresenta a comparação entre paver tradicional e drenante.

Figura 1: Comparação entre paver comum e paver permeável.



Fonte: Autor (2023).

Considerando a busca por materiais mais sustentáveis, existem muitos estudos na literatura sobre o uso de materiais residuais em concreto permeável, objetivando o desenvolvimento de uma solução de infraestrutura verde. Cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escórias, lama vermelha, cinza da casca do arroz, casca de óleo de palma, resíduos de conchas, resíduos de construção e demolição, vidros triturados e borracha de pneu são alguns exemplos de materiais resíduas avaliados nesse tipo de solução (YANG; JIANG, 2003; SABOO et al., 2019; LANG et al., 2019; CHEN et al., 2019; PECEÑO et al., 2019); ZAETANG et al., 2016; SATA et al., 2013; LU et al., 2019; LI et al., 2019).

De acordo com a literatura, concreto permeável produzidos com a incorporação de resíduos tem apresentado desempenhos adequados. Segundo Toghroli et al. (2017), as características mecânicas desses concretos (especialmente resistência à compressão, flexão e permeabilidade) dependem fundamentalmente do tipo de resíduo aplicado. Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais apresentam características distintas dos materiais anteriormente citados, e desconhece-se estudos de seu uso em concreto permeável. Desta forma, a presente pesquisa concentra-se na utilização desses resíduos como constituinte de concreto permeável, mais especificamente para fabricação de blocos intertravados – pavers, utilizados em pavimentação urbana.

Devido a elevada finura do RBRO, sua incorporação no concreto permeável constitui a matriz da pasta, com menor impacto nos macros espaços vazios, deixados pela redução do conteúdo de agregado miúdo da mistura e, conseqüentemente, evitando o impacto negativo na permeabilidade. Aliado a isso, por serem potencialmente inertes e provenientes de rochas ígneas ou metamórficas, podem agir como locais de nucleação para promover o crescimento de hidratados, além de aumentar a rigidez do compósito (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2021).

A relevância desse trabalho se justifica pela importância da inserção efetiva da sustentabilidade e da economia circular no âmbito da construção civil, especialmente quando isso está presente em pelo menos três objetivos do desenvolvimento sustentável divulgados pela United Nations - UN (2019): Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS 9); Cidades e Comunidades Sustentáveis (ODS 11); Consumo e Produção Sustentáveis (ODS 12).

Diante do exposto, esse trabalho consistiu na fabricação de pavers drenantes incorporados com diferentes teores de resíduos de rochas ornamentais em substituição ao cimento, além da execução de testes laboratoriais que permitiram maior entendimento quanto aos parâmetros de permeabilidade, resistência à compressão e resistência à abrasão, a fim de avaliar as peças em função dos valores mínimos exigidos pelas normas vigentes (NBR 16416, ABNT 2015; NBR 12042, ABNT 2012).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Avaliar os efeitos da incorporação de resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais nas propriedades mecânicas e de permeabilidade de pavers permeáveis.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais (mármore e granito), a fim de se obter informações sobre suas características químicas e físicas, e como estas podem influenciar nas propriedades dos concretos permeáveis;
- Avaliar os efeitos da substituição de cimento por RBRO (mármore e granito) em teores de 0, 5, 10 e 15% nas propriedades de porosidade, permeabilidade, resistência à abrasão e resistência à compressão de pavers drenantes.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Resíduos

Resíduos são todos os materiais que são gerados durante a fabricação de um produto ou etapa de algum processo, em sua maioria industrial, porém, estes não são inicialmente produzidos com objetivo de comercialização. Estima-se que a quantidade de resíduos gerados para a fabricação de algum material possa conter 5 vezes mais volume que o produto final (JOHN, 2000).

Na Europa, cerca de um terço de todo resíduo gerado é devido a demolições (JOHN, 2017), visto que o “velho continente” passa hoje por reformas e novas construções. O descarte de resíduos em aterros tem sido preocupante, uma vez que resíduos de matéria orgânica em condições anaeróbicas, podem emitir gás metano, que contribui de 21 a 25 vezes mais para o aquecimento global que o próprio CO₂ (JOHN, 2017). Por este panorama global atual, meios de conter o descarte desenfreado e indevido destes resíduos e suas devidas destinações passam a ser cada vez mais importantes e necessárias.

A substituição ou diminuição do consumo de cimento em matrizes cimentícias é uma excelente alternativa para minimizar a poluição ocasionada para fabricação do clínquer utilizado para produção de cimento, bem como a utilização de resíduos como matéria-prima pode reduzir o consumo de recursos naturais.

A economia circular é um fator que pode contribuir à necessidade de utilizar resíduos para fins ecológicos. A concentração atmosférica de dióxido de carbono atingiu 400 ppm (partes por milhão), nos últimos 800 mil anos não houve tamanha medição (JOHN, 2017).

3.2. Indústrias de Rochas Ornamentais

O estado do Espírito Santo é o maior extrator e fornecedor de rochas ornamentais do Brasil, além de conter a maior reserva de mármore do país, é também um grande produtor de granito. Cerca de 56% de toda produção nacional vem do Espírito Santo, o que, em contrapartida, contribui para que o estado seja o maior produtor de RBRO. No município de Cachoeiro de Itapemirim encontra-se registros da exploração de rochas ornamentais datado de 1950. Naquela época, em busca de jazidas de calcário, imigrantes italianos que residiam na região acabaram por

descobrir jazidas de mármore. Os italianos, conhecedores do mineral, começaram a explorá-las (SABADINI E VILLASCHI, 2000). Na Figura 2 tem-se uma pedreira de calcário, em Cachoeiro de Itapemirim (ES), no ano de 1958.

Figura 2 – Pedreira de calcário em Cachoeiro de Itapemirim (ES), 1958.



Fonte: IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=416828&view=detalhes>.

Os processos de corte e beneficiamento de rochas ornamentais geram diferentes tipos de resíduos com distintas composições. O resíduo granalha por exemplo, é proveniente do corte com lâmina metálica, utilizando granalha de aço. Resíduo diamantado é gerado quando o processo de corte é feito com fio diamantado. Resíduo de levigação está relacionado com a etapa de levigação, proveniente do procedimento para desengrossar as chapas. E, por fim, o resíduo de polimento, este é gerado nos últimos processos do beneficiamento, no desbaste da chapa (SANTOS; DESTEFANI; HOLANDA, 2013).

Geralmente são utilizados dois procedimentos de serragem, também chamado de desdobramento, para obtenção das chapas. O primeiro se dá pela ação da lâmina metálica (elemento abrasivo) agindo por meio de um pistão em um cilindro, provocando alternadamente compressão e depressão, desagregando os cristais da rocha (PONTES, 2005).

O segundo procedimento é por meio de fios diamantados. Esta tecnologia tem sido a mais difundida e utilizada na indústria de rochas ornamentais devido ao baixo custo de implementação, maior velocidade, versatilidade nos diferentes tipos de corte, além do baixo desperdício de material comparado com outras tecnologias. Este método de desdobramento consiste na utilização de cabos galvanizados que servem de suporte para pérolas diamantadas, chamados de fios diamantados. Os cabos são coordenados por uma polia motora e outra polia tratora. O movimento de rotação da polia motora acarreta em movimento linear do fio diamantado, enquanto que a polia tratora trabalha garantindo o tensionamento, seguindo assim com o processo de corte. A Figura 3 apresenta um tear multifios, em processo de corte (COSTA et al., 2009; MONTEIRO et al., 2014).

Figura 3: Processo de desdobramento por meio de tear multi-fios.



Fonte: Autor (2023).

Durante esses procedimentos, são gerados volumes significativos de rejeitos. Estes são produzidos em forma de lama geralmente constituídos de água e rocha moída. Parte da água usada no processo de corte e que é misturada aos outros constituintes da lama é tratada e reaproveitada no processo. Mas uma outra parte do rejeito, mais densa, é destinada à aterros, medida esta que pode comprometer o meio ambiente (MENDES et al., 2016). Na Figura 4, pode-se observar resíduo proveniente do corte de rocha ornamental, gerado por uma empresa de Vitória - ES.

Figura 4 - Resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais.



Fonte: Autor (2023).

No estado do Espírito Santo, geralmente são usadas duas formas de separação da água da lama, o silo de decantação e o leito de decantação. Ambas são eficazes, porém o silo é um meio eletrônico, necessitando de mão de obra qualificada e manutenção. Algumas empresas não têm força econômica o suficiente para realizar o tratamento dos resíduos provenientes dessas rochas ornamentais. Em Cachoeiro de Itapemirim/ES existem unidades gerenciadoras destes resíduos (ADAMAG) que além de promoverem a destinação legal para os resíduos sólidos, oferecem cursos de especialização em análise ambiental (MENDES et al., 2016).

3.3. Resíduos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) em Misturas Cimentícias

O descarte inadequado de RBRO é um problema a ser enfrentado, uma vez que são, em geral, destinados à aterros, lagos, rios e córregos. Quando líquida, a lama proveniente dos cortes afoga animais e plantas, e quando seca pode gerar poeiras que, ao serem inspiradas, causam danos à saúde. A reutilização dos mesmos em misturas cimentícias é uma saída que pesquisadores estão encontrando para diminuir o descarte destes coprodutos (SILVA, 2018).

Na indústria da construção, as aplicações de RBRO são, em sua maioria, para produção de concreto e fabricação de alguns elementos de construção. São inseridos em matrizes cimentícias a fim de se atender certas propriedades como:

aumento de resistência à compressão e flexão, durabilidade, trabalhabilidade, resistência à abrasão e outros. Todas essas características obtidas estão diretamente relacionadas com a porcentagem utilizada do subproduto em questão. Sureshchandra et al. (2014) mostraram, por exemplo, que a substituição de até 50% de areia por RBRO em blocos de concreto gera melhor desempenho no que diz respeito à resistência à compressão. No entanto, quando o teor do pó ultrapassa 50%, o desempenho em relação às características mecânicas originais dos blocos diminui.

Há uma quantidade significativa de materiais que podem se beneficiar da utilização de resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais em suas fabricações. Barros et al. (2020) mostraram que ao misturar resíduos de rochas ornamentais (calcários) incorporados com poliéster e peróxido de metiletilcetona, pôde-se produzir um novo tijolo, com elevada resistência à compressão, boa estabilidade térmica e resistência ao fogo.

Ao avaliar a resistência e durabilidade de misturas de argamassa magra contendo resíduos de mármore, Khyaliya et al. (2017) observaram que a substituição de 10% de cimento pelo resíduo resultou em ganho de resistência e reduziu a corrosão e carbonatação. Por outro lado, nessa mesma pesquisa os autores obtiveram resultados insatisfatórios ao incorporarem tais resíduos em matrizes cimentícias de alto desempenho.

Fares et al. (2019) concluíram que diferentes porcentagens de resíduos de mármore introduzidas em matrizes cimentícias de alto desempenho, chegam à diferentes resultados. Nessa pesquisa, os autores observaram que 45% de substituição apresentou deterioração mínima devido à ataque de sulfatos. Um máximo de 30% de substituição reduziu a permeabilidade e melhorou as propriedades mecânicas,

Arrivabene (2012) analisou misturas binárias contendo resíduo proveniente do corte de granito e escória de aciaria, a fim de obter resultados que permitissem a utilização destes materiais na produção de cimento. A escória de alto forno, a depender do processo de resfriamento, pode ter características cimentícias adequadas, sua basicidade entre 0,9 e 1,2 tornam sua utilização na fabricação de cimento propícia. O pesquisador incorporou resíduos de granito em escória de aciaria, com a finalidade de obter valores de basicidade aproximados ao da escória

de alto forno (1,2), e obtiveram resultados satisfatórios. Suas conclusões mostraram que o alto teor de óxido de silício (SiO_2) do RBRO possibilitaram sua utilização, além de confirmar que as propriedades hidráulicas do composto criado eram adequadas. Propriedades como resistência à compressão, início e fim de pega e finura também ficaram dentro dos valores permitidos pela norma.

Silva (1998) caracterizou resíduos provenientes da serragem de granito do estado do Espírito Santo, com o objetivo de incorporá-los na fabricação de argamassas de assentamento e tijolos de solo-cimento. Segundo Silva (1998), por meio das caracterizações físicas, morfológicas e químicas, o resíduo apresentou potencial para ser utilizado na produção de materiais de construção. Para a incorporação em argamassas de assentamento, o pesquisador concluiu que a retenção de água da matriz ficou acima de 80%, o que a classifica como adequada, segundo as normas vigentes. Ainda para a utilização em argamassas, em relação a exigências mecânicas e físicas, os resultados foram satisfatórios. Para os tijolos de solo-cimento, percebeu-se que a incorporação ideal é de 50% com relação à massa de solo seco. Incorporações com teores acima de 50% podem resultar em peças de tijolos com desempenho insatisfatório. Dois fatores que adequaram este tijolo ao uso, foram a resistência à compressão média, com valores superiores à 2,0 MPa (mínimo exigido pela norma), e a absorção de água adequada, com valores inferiores à 20%. Os resultados obtidos pelo pesquisador foram promissores, agregando valor técnico e ambiental a este resíduo.

Conforme exposto, o RBRO já foi estudado em diversos tipos de materiais e aplicações. No entanto, desconhece-se estudos de sua incorporação em concreto drenante, mais especificamente para este trabalho: pavers drenantes. Este tipo de solução para pavimentações será explanado mais à frente no item 3.6.

3.4. Materiais Cimentícios Suplementares

As adições ou materiais cimentícios suplementares são amplamente usados em concretos e argamassas, seja compondo o cimento comercial ou adicionados separadamente durante a produção das misturas. O uso de tais materiais, onde nenhum aumento de clínquer adicional está envolvido, leva a uma redução significativa nas emissões de CO_2 , além de utilizar subprodutos de processos industriais (LOTHENBACH; SCRIVENER, HOOTON, 2011).

As pozolanas (cinza volante, metacaulim, sílica ativa, cinza da casca de arroz) e as escórias de alto forno, são considerados os principais materiais cimentícios suplementares, que, junto ao fíler calcário, compõem as adições dos cimentos atualmente comercializados. Apesar de alguns destes materiais serem subprodutos ou resíduos de outros processos industriais, atualmente, não representam necessariamente um passivo ambiental, pois praticamente todo volume produzido é absorvido pela indústria cimenteira (SCHANKOSKI, 2017).

Este cenário atual estimula a busca por novas fontes de matérias-primas que apresentem volume e preço condizentes com a demanda futura. Um dos resíduos industriais que apresenta tais características e que atualmente possui pouca ou nenhuma destinação é o material oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais. Há diferentes tipos de rochas ornamentais no mercado, cada uma delas gera resíduos com características diferentes, diferenciando assim seu método de tratamento e também sua destinação. Dentre as principais pode-se citar os granitos, quartzitos, calcários e os mármore. Sabe-se que as adições podem ser incorporadas em matrizes cimentícias para prover propriedades/características, tanto no estado fresco, como no endurecido. Resistência à compressão, durabilidade, dureza, resistência ao fogo e redução de custos são alguns dos atributos que podem ser otimizados por esta incorporação. As adições podem ser ativas ou inertes. Os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais podem ser classificados como materiais inertes, agindo principalmente como fíler nos sistemas cimentícios.

Os tipos de fílers se diferem por suas características físicas (finura, forma e superfície), químicas e mineralógicas. O comportamento do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido, é influenciado pelas características de seus constituintes, isso torna a compreensão destes materiais de suma importância (COURARD, 2014).

Um dos motivos para incorporar fílers à mistura, é conseguir uma mesma mobilidade, para uma menor quantidade de água. A redução de água na mistura é uma forma de alcançar maior eficiência de um ligante (cimento, por exemplo). Quando os grãos estão em um meio sem a presença de um fluido, há vazios entre eles. Estes vazios são preenchidos no momento da incorporação de água, dispersando os grãos e proporcionando maior mobilidade, que é proporcional ao afastamento, já que quanto maior a distância entre os grãos, maior a mobilidade. A

incorporação de fíler tem potencial para melhorar o empacotamento do sistema (SU; MIAO, 2003; DAMINILI, 2013).

Para que se tenha conhecimento do volume de fílers a serem incorporados para um empacotamento ideal, é necessário que se calcule o volume de vazios presentes entre as partículas, volume esse chamado de porosidade intergranular (DAMINILI, 2013). Em pesquisa realizada, Damineli (2013) adotou algumas premissas para facilitar o cálculo e as interpretações dos resultados. Primeiramente foi definido que todas as partículas seriam esféricas e que os grãos teriam o mesmo diâmetro. Segundo Funk; Dinger (1994), nesta condição estabelecida, a porosidade pode chegar de 36 a 40%, porém, em sistemas parecidos com empacotamento ordenado, a porosidade pode ser reduzida para apenas 26% (DAMINILI, 2013).

Analisando do ponto de vista reológico, é fundamental que haja entendimento da interação das partículas. O concreto, por exemplo, é composto por agregados, finos (inertes ou reativos) e água. A água tem influência na movimentação dos finos, eles se unem criando a pasta. Com essa união a pasta ganha “força” e passa a ter a capacidade de mover os agregados. Toda essa movimentação acarreta uma série de influências reológicas. Os conceitos de viscosidade e tensão de escoamento passam a influenciar em propriedades importantes que determinam certos comportamentos químicos e físicos da matriz cimentícia (DAMINILI, 2013).

Embora este material não seja considerado uma adição quimicamente ativa, como pozolanas e escórias de alto forno, segundo Gutteridge e Dalziel (1990), mesmo materiais inertes misturados ao cimento podem ter um efeito significativo na hidratação das fases do clínquer, por meio do efeito de preenchimento.

Sendo assim, de maneira geral, percebe-se alguns efeitos positivos da incorporação de fíler em uma matriz cimentícia, melhora das propriedades mecânicas, melhora da trabalhabilidade e diminuição da porosidade, dificultando a penetração de agentes agressivos, além de melhorar a interação entre pasta e agregado (KRONLOF, 1994).

3.5. Propriedade de Materiais Cimentícios Suplementares

Os materiais cimentícios suplementares, também chamados de adições, são amplamente utilizados em concretos e cimentos, seja incorporando-os nos cimentos

comercializados, seja adicionando-os separadamente como constituinte durante a mistura do concreto. A maioria dos estudos disponíveis sobre as propriedades dos sistemas contendo essas adições enfoca em aspectos mecânicos ou de durabilidade, especialmente relacionados às adições mais tradicionais, como escória de alto forno, pozolanas e fíler calcário.

No entanto, é sempre necessário conhecer as propriedades intrínsecas dessas partículas finas, especialmente quando se faz uso de materiais não tradicionais, para compreender sua influência nas matrizes cimentícias com elas produzidas. A mistura de adições com cimento Portland leva a um sistema mais complexo, onde hidratação do cimento e a reação hidráulica, ou mesmo a presença física dos materiais suplementares ocorrem simultaneamente e podem influenciar a reatividade um do outro (LOTTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Nesse tópico serão explanados aspectos sobre características dos materiais cimentícios suplementares e suas correlações com o desempenho de misturas cimentícias, para efeito comparativo com os RBRO.

3.5.1. Mineralogia

Segundo estudos experimentais e confirmação estatística por análise de variância desenvolvida por Damineli (2013), a origem mineralógica de um fíler influencia fortemente na resistência mecânica quando incorporado como substituto de cimento Portland em pastas. O autor estudou fílers de diferentes origens mineralógicas (cálcário, dolomítico, quartzito, cristobalita, nefelina sienita e granito) e também fílers de mesma mineralogia, mas provenientes de diferentes fontes. Para os estudos, as amostras foram analisadas em função da forma, tamanho de partículas e mineralogia. Embora todas as três variáveis tenham apresentado influência no desempenho mecânico de misturas cimentícias, a influência foi mais evidente em função da classificação mineralógica do fíler, quando as outras variáveis se mantiveram constantes.

Stewart et al. (2006) também perceberam em estudos que, em 14 amostras de fílers com diferentes tipos de mineralogia, e utilizando dos mesmos meios de caracterização de Damineli (difração por raios-x), a característica mineralógica também era o fator que mais influenciava para mecânica de misturas. Além disso, Stewart et al (2006) perceberam que a absorção de azul de metileno (AASHTO TP

57, 2000) e, conseqüentemente, a demanda de água para dada fluidez da mistura, é influenciada pela mineralogia do fíler empregado na sua composição.

Pesquisando sobre a demanda necessária de aditivos para misturas de concreto autoadensável, Schankoski et al. (2017) concluíram que embora a quantidade de aditivo a ser incorporado seja influenciada pela área superficial do fíler adicionado - neste caso calcário, diabásio e gnaïsse - esta é mais induzida pela sua mineralogia, uma vez que, pastas contendo fílers de áreas superficiais parecidas mas com diferentes mineralogias, apresentaram uma diferença significativa quanto à quantidade de aditivo necessária para promover dada trabalhabilidade.

Análises reológicas desenvolvidas por Schankoski (2017) com pastas e concretos autoadensáveis contendo fíler de diferentes mineralogias (calcário, diabásio e gnaïsse) e mantendo a fluidez fixa pelo ajuste de superplastificante, permitiram concluir que a mineralogia do fíler foi um fator de significativa influência nos valores de viscosidade das misturas. Por outro lado, a tensão de escoamento estática e dinâmica não apresentou diferenças significativas com a mudança de mineralogia do fíler presente, para uma mesma relação água/finos.

Em relação à resistência à compressão, Schankoski et al. (2019) estudaram fílers de origem diabásica, gnáïssica e calcária. Fílers diabásicos e gnáïssicos não produziram misturas com significativas diferenças entre si em relação à resistência à compressão, mas são notoriamente superiores àquelas contendo fíler calcário. Para propriedades de tração por compressão e módulo de elasticidade, os autores concluíram que a característica mais influente nas misturas foi a mineralogia do fíler utilizado.

Diante do exposto, a caracterização mineralógica se mostra importante para compreender o comportamento das misturas produzidas com diferentes finos. Os autores citados utilizaram de métodos como difração por raios-x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para obter informações sobre essas características e pautar como e por que elas agem na microestrutura das amostras em análise. Ficou claro que, após analisar alguns tipos de fílers e incorporá-los em matrizes cimentícias, distintas mineralogias podem influenciar de maneira significativa as propriedades dos produtos com eles produzidos (STEWART et al.,

2006; DAMINELI, 2013; COURARD, 2014; SCHANKOSKI, 2017; SCHANKOSKI et al., 2019).

3.5.2. Finura

As adições, de forma geral, são materiais finos, com área superficial próxima ou maior que a do cimento Portland. Uma característica das partículas finas, é a tendência que as mesmas têm de se aglomerar, devido à sua grande área superficial. Essas partículas aglomeradas agem como se fossem uma única partícula grande, modificando a distribuição granulométrica do composto, gerando vazios que acarretam em um maior consumo de água e dificultando a mobilidade do fluido devido ao bloqueio que estes aglomerados fazem às partículas menores, aumentando assim a viscosidade (OLIVEIRA et al. 2000).

O processo de empacotamento das partículas gerado por um fino pode, em teoria, ajudar na redução de água para proporcionar uma mesma mobilidade, dispersando as partículas presentes (SU; MIAO, 2003). Os fílers incorporados na mistura preenchem os vazios que posteriormente seriam ocupados por água, assim, as partículas seriam dispersadas também por finos, e não somente por água, diminuindo a demanda da mesma (DAMINELI, 2013). Entretanto, o que acontece no geral é que, apesar do empacotamento possibilitar esta dispersão, os finos apresentam área superficial superior aos materiais que estão substituindo e, somado as características morfológicas (rugosidade e angularidade), tendem a ter uma maior influência na demanda de água de uma matriz cimentícia, acarretando maior consumo (DAMINELI, 2013).

Estudando o efeito da incorporação de fílers de origem calcária, diabásica e gnáissica em concreto autoadensável, Schankoski et al. (2017) utilizaram do processo de moagem com um moinho de bolas para preparar tais finos para incorporação. Estes finos foram coletados nas pedreiras com diâmetros médios de 33 a 38 μm , e moídos até que chegassem a um diâmetro próximo à do cimento (15 μm) para efeito de comparação. Os pesquisadores concluíram, em relação à finura dos fílers estudados, que, em termos reológicos, a finura das partículas e o teor de finos incorporados nas matrizes cimentícias são os fatores que mais interferem na viscosidade da mistura. Além disso, uma maior quantidade de finos incorporados,

acarreta em um maior calor total liberado, o que indica uma influência na cinética de hidratação do cimento Portland.

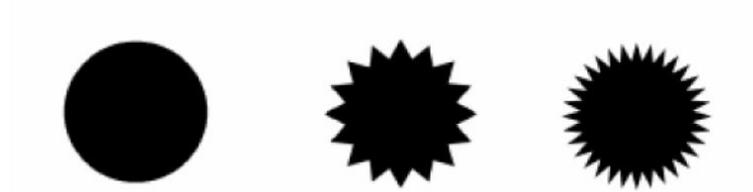
Schankoski et al. (2019) perceberam que, ao moerem filers de origem gnáissica e diabásica até uma granulometria semelhante à do cimento (15-16 μm), houve melhora nos parâmetros de rugosidade, angularidade e razão de aspecto. Assim, a moagem de partículas finas, ou a utilização de partículas mais com menores granulometrias, pode contribuir para obter características morfológicas mais vantajosas (partículas mais equidimensionais).

Contudo, Schankoski et al. (2017) observaram que a incorporação de filers mais finos em concretos autoadensáveis, resulta em uma mistura com menor mobilidade entre as partículas, exigindo a utilização de aditivos superplastificantes. Os autores notaram também que há uma tendência de aumento da resistência à compressão em concretos autoadensáveis com a presença de filers mais finos do que in natura, ambos com a mesma mineralogia. Isso provavelmente se deve ao fato de as partículas mais finas comporem a matriz, de forma a compactá-la.

3.5.3. Morfologia das Partículas

A morfologia de uma partícula é uma propriedade que depende de fatores como relação de aspecto, rugosidade e angularidade. A relação de aspecto consiste na relação entre o comprimento (maior dimensão) e a espessura (menor dimensão do grão). A rugosidade pode ser interpretada como textura ou aspereza. Já a angularidade, faz referência ao arredondamento, analisando o número de “cantos” ou “quinas”. Estas características podem ser observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que fornece imagens de alta resolução da superfície da partícula (STEWART et al., 2006; DAMINELI, 2013). Masad et al. (2005) mostraram, conforme Figura 5, a representação de partículas arredondadas (mesma relação de aspecto), contudo, com diferentes angularidades e texturas.

Figura 5: Partículas arredondadas, mas com diferentes angularidades e texturas.



Fonte: Masad et al. (2013).

Essas três características podem ser calculadas pelas equações que definem os seus graus de deformidade. No que se diz respeito ao valor da relação de aspecto, um resultado igual a 1, significa uma partícula equidimensional, ou seja, arredondada. Conforme este valor aumenta, a partícula se mostra mais alongada ou plana. O conceito é o mesmo para a angularidade, para um valor igual a 1, tem-se um círculo ou uma elipse, para valores acima de 1, tem-se uma partícula mais angular. E o valor para a rugosidade será maior conforme a superfície apresenta mais reentrâncias e, portanto, seja mais rugosa (KUO, 2002).

Analisando aspectos como angularidade, rugosidade, relação de aspecto e fator de forma de fílers de origem calcária, diabásica e gnáissica, Schankoski (2017) relatou importantes considerações referente as mesmas. Levando em consideração fatores de angularidade, rugosidade e relação de aspecto, o fíler calcário se mostrou mais propício ao uso que os demais fílers em questão. Esta mesma conclusão também foi apresentada por outros autores, que demonstraram que a forma das partículas é uma característica desvantajosa para finos com diferentes origens mineralógicas à do fíler calcário (HO et al., 2002; STEWART et al., 2003; RAMOS et al., 2013).

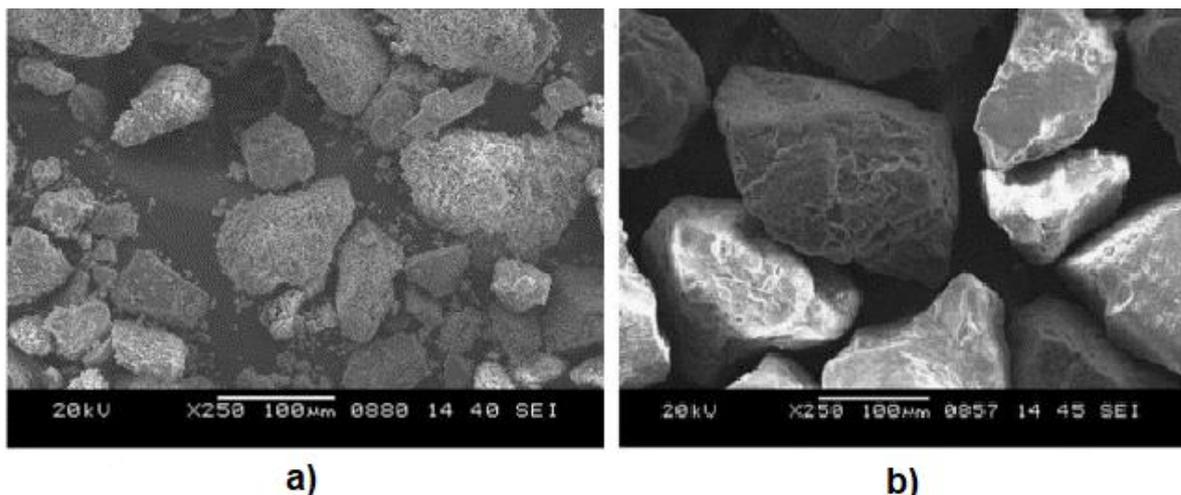
Uma medida para avaliar a interferência da forma de uma partícula em uma matriz cimentícia chama-se fator de forma (FF). O fator de forma pode ser definido pela relação entre a área superficial real e a área superficial teórica (HUNGER; BROUERS, 2009). Enquanto a primeira é determinada pelo ensaio BET, a segunda é calculada matematicamente a partir dos tamanhos de partículas determinados na composição granulometria. Um grão com uma área superficial maior, acarreta

maiores vazios na mistura, necessitando assim de mais água para preencher os espaços e promover a mobilidade adequada (PILEGGI et al., 2003).

Damineli (2013) mostrou que quanto maior o fator de forma de um fíler maior a adsorção de água na mistura, uma vez que sua elevada rugosidade superficial acarretou em uma maior área superficial, e, é nesse excesso de área que a água é adsorvida em maior volume. Assim, a característica da superfície de um grão influencia fortemente na demanda de água da matriz cimentícia, sendo que uma superfície angular exige mais água do que uma esférica (HUDSON, 2003 apud STEWART et al., 2006).

Felekoglu (2007), estudando também a influência da forma das partículas na demanda de água de misturas de concreto, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou a influência da superfície de uma partícula. Ao analisar e comparar fíler calcário e de quartzo, ambos com a mesma finura, o pesquisador notou que o primeiro exige 30% a mais de superplastificante que o segundo para manter uma mesma trabalhabilidade para uma mesma quantidade de água. O autor justificou esse resultado pela textura superficial acentuada do calcário (maior rugosidade). Observa-se na Figura 6, por meio de imagens de MEV, essa diferença de rugosidade entre partículas de calcário (a) e quartzo (b).

Figura 6 - Imagens MEV de partículas de calcário (a) e de quartzo (b).



Fonte: Felekoglu (2007).

Conforme mencionado, a forma de uma partícula está diretamente relacionada com a adsorção de soluções e, portanto, com a absorção/adsorção de água durante a mistura de concretos. Dessa forma, características de superfície também podem ser

mensuradas por meio do ensaio de adsorção por azul de metileno. Esta técnica pode contribuir para a análise da superfície das partículas de um fíler determinando a quantidade de solução que uma partícula fina pode adsorver e, segundo Stewart et al (2006), ela tem sido usada com sucesso para a caracterização de agregados.

Marchon et al. (2016) observaram que o teste de azul de metileno pode ser usado também para quantificar o teor de superplastificantes que são adsorvidos pelas partículas de um fino. Estes aditivos, em especial os policarboxilatos, podem se adsorver em argilominerais, e se este estiver presente em um fíler, pode demandar de uma quantidade muito maior de superplastificante que o normal. Schankoski (2017) comprovou este dado quando percebeu que partículas de fíler calcário apresentaram baixa adsorção por azul de metileno quando comparadas a outros finos (gnáissicos e diabásicos), proporcionando assim uma menor demanda de superplastificantes.

Portanto, fica claro que compreender a morfologia e a capacidade de adsorção de uma partícula é importante para o controle de incorporação de aditivos (MARCHON et al., 2016).

3.5.4. Influência de finos na hidratação

As adições influenciam diretamente na hidratação de alguns componentes do clínquer, além de modificar a cinética de hidratação do cimento alterando algumas propriedades físicas e mecânicas. Estes materiais, chamados de materiais cimentícios complementares ou suplementares, podem ser divididos em não inertes e inertes (NEVILLE, 1997).

Fílers não inertes são finos que reagem quimicamente com os componentes da matriz, modificando sua microestrutura e formando produtos de hidratação que contribuam para atributos como resistência mecânica e durabilidade. São exemplos deste tipo de fino os materiais cimentícios (escória de alto-forno) e os pozolânicos (cinzas volantes) (ISAIA, 2007).

Finos inertes são fílers que não reagem quimicamente, possuindo características e propriedades de enchimento. A sua adição em matrizes cimentícias está relacionada à ideia de preenchimento dos espaços vazios existentes na microestrutura, que seriam posteriormente preenchidos por água. Assim, um controle adequado de

dispersão, empacotamento, interação entre as partículas e superfície específica dos grãos é fundamental para que o objetivo de potencializar um ligante seja alcançado por meio da redução de água (DAMINELI, 2013).

Cyr et al. (2006) e Irassar et al. (2015) classificaram os efeitos de finos no processo de hidratação. O primeiro seria em função do efeito da diluição dos grãos de cimento. O segundo, seria o efeito físico, que engloba o efeito fíler e nucleação heterogênea. E, por fim, o efeito químico, no que diz respeito a reações pozolânicas e/ou cimentícias da adição de finos.

No que se diz respeito aos efeitos físico da influência dos finos no processo de hidratação, Tutikian e Dalmolin (2008) os dividiram em três principais fatores: a formação de pontos de nucleação que resultam no refinamento dos produtos de hidratação das partículas de cimento e dos poros; a baixa granulometria que preenche os vazios aumentando a densidade, acarretando em um efeito fíler e, por último, a eliminação ou redução do acúmulo de água livre pela alteração da microestrutura da zona de transição.

O C-S-H (silicato de cálcio hidratado) é o principal componente formado quimicamente na hidratação do cimento, sendo o maior responsável pela resistência mecânica. Ele interage com os finos não inertes incorporados na mistura. Isso acontece porque pode ocorrer reações químicas com os finos presentes, ou ainda a presença do fino pode contribuir para uma melhor distribuição do próprio C-S-H na matriz, acarretando assim em uma menor quantidade de poros (HAWKING; TENNIS; DETWILER, 2003). Irassar et al. (2015), chegaram a esta mesma conclusão percebendo que, a estrutura de poros de uma matriz cimentícia é determinada pela evolução da sua hidratação, em função da presença de finos, e independentemente dos compostos utilizados na mistura, tendem a contribuir para quantificar a taxa de absorção capilar e resistência à compressão.

A fim de justificar este ganho de resistência mecânica pela incorporação de fílers em matrizes cimentícias, alguns autores relataram possíveis causas. Uma delas é o fato de a granulometria influenciar por meio do teor e da finura das partículas introduzidas. Acredita-se que no processo de hidratação, a distribuição granulométrica influencia modificando os poros nos primeiros momentos de hidratação da mistura (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003). Este dado também foi

observado por Irassar et al. (2015). Os autores perceberam que, em cimentos com adições de fíler calcário e escória (cimentos binários), o fíler de procedência calcária (inerte) contribui para o processo de hidratação precoce, enquanto a escória (quimicamente ativa) influenciou tardiamente. Assim, concluíram que há a possibilidade de modificar e controlar a evolução da hidratação do cimento alterando os teores e a granulometria dos finos presentes nas misturas.

Outra possível explicação para este ganho de resistência por meio da hidratação é devido à diluição das partículas de cimento. Entende-se que, ao substituir clínquer por outro material, no caso um fíler, existe aparentemente mais espaço disponível para que as partículas reajam formando compostos hidratados. Essa formação se equivale a um aumento de água em proporção ao cimento (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Outros autores também ratificaram a importância do processo químico na aceleração da hidratação do cimento acarretado por diferentes tipos de finos. Ao incorporar fíler de quartzo e pó de alumina grosso, Kadri, Aggoun e Schutter (2010) perceberam que não houve diferença significativa no processo de hidratação de uma matriz cimentícia. Entretanto, fíler calcário e pó de alumina fino possibilitaram maior nucleação das partículas propiciando que um maior número de hidratos pudesse se desenvolver.

3.5.5. Ensaio de Caracterização dos finos

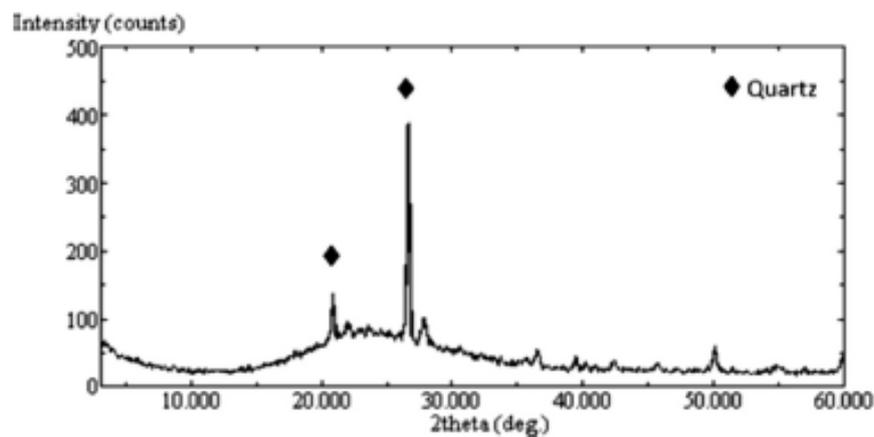
No decorrer dos tópicos anteriores, ensaios de caracterização foram citados como forma de obter informações que possibilitem melhor entendimento das características dos finos. O presente tópico traz uma abordagem técnica do uso desses ensaios e técnicas de caracterização.

3.5.5.1. D.R.X.

A difração por raios-x (DRX) é uma técnica relativamente recente, e vem sendo utilizada amplamente para controle de qualidade e análise de materiais para a fabricação de cimento. A caracterização por meio do DRX é um processo no qual os raios são disseminados pelos elétrons dos átomos do material, propiciando o entendimento das suas distribuições acarretando informações cruciais de suas composições (GOBBO, 2009).

Vazzoler et al. (2018) utilizaram do método de difração por raios-x para caracterizar resíduos provenientes do corte de rocha ornamental após moagem e tratamento térmico a 1200°C, a fim de obter características pozolânicas e incorporá-las em pastas de cimento Portland. Esse teste possibilitou que os pesquisadores observassem partículas de quartzo presentes no resíduo estudado em questão, conforme observa-se na Figura 7. Informação essa que permitiu comparar a composição mineralógica do material alternativo estudado, com cinza volantes, pozolanas amplamente usadas na produção de cimento, embora ficou claro neste trabalho que o resíduo tratado termicamente possui baixa atividade pozolânica quando usado para fabricação de pastas cimentícias.

Figura 7 - Picos de partículas de quartzo encontradas em resíduos de mármore após tratamento térmico por DRX.



Fonte: Vazzoler et al. (2018).

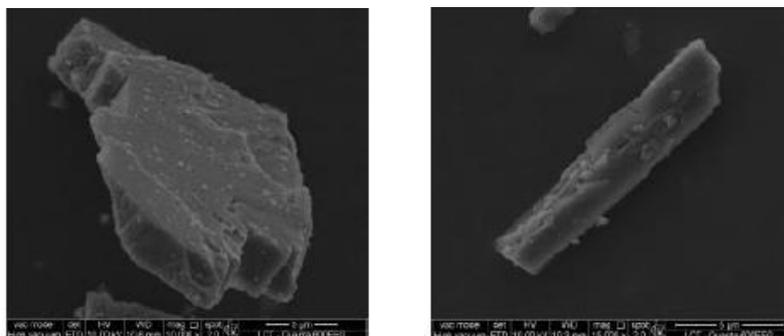
A presença de fases cristalinas na composição química dos RBRO, identificadas pela difração de raios-x, proporcionam melhor entendimento dos parâmetros relacionados à reatividade de determinado resíduo estudado. Isaia (2007) mostra que materiais com maior presença de fases amorfas, tendem a ter comportamentos mais reativos com outras substâncias, diferentemente dos materiais cristalinos que, por sua vez, tem uma maior resistência a reações químicas. A grande presença de quartzo, um material tipicamente cristalino, na composição química dos RBRO, corrobora com o fato dos mesmos serem considerados inertes e não reagirem (ou reagirem pouco) quimicamente com os componentes da mistura.

3.5.5.2. M.E.V.

As imagens de alta resolução obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitem ao pesquisador caracterizar a angularidade, a forma e a textura superficial de finos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A preparação para realizar os procedimentos e obter as imagens adequadas se dá, geralmente, por espalhar o resíduo (em pó) com uma fita não adesiva, em cima de uma fita adesiva de carbono, pressionando-o suavemente para que não haja danos às partículas, garantindo assim aderência. A quantidade de resíduo espalhado sobre a fita adesiva para análise também deve ser controlada, para que não haja excesso, este pode prejudicar a aderência (FELEKOGLU, 2009).

A importância destas caracterizações se dá, segundo Mehta e Monteiro (2014), pelo fato que, quanto mais arredondado for a partícula do fino, menor a necessidade de água para uma mesma fluidez, ou seja, há uma menor necessidade de pasta para cobrir as partículas, promovendo assim maior mobilidade (rolamento e lubrificação). Daminieli (2013) corroborou com este dado quando comparou imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura de fílers calcários e silicosos. Pôde-se perceber, conforme mostrado na Figura 8, que as partículas silicosas mostraram uma morfologia mais alongadas que as de procedência calcária, esta diferença resultou em uma maior exigência de água e dispersante, além acarretar em uma maior viscosidade.

Figura 8 - MEV: Fíler calcário x silicosos.



Fonte: Daminieli (2013).

3.5.5.3. Adsorção por Azul de Metileno

A caracterização de finos pela adsorção de azul de metileno (AASHTO TP 57, 2000), auxilia na investigação das características da superfície das partículas, em virtude da sua forte adsorção em suportes sólidos. Este teste determina a quantidade de uma solução que as partículas conseguem adsorver (STEWART et al., 2006).

Considerada uma técnica simples e confiável, o azul de metileno, um corante catiônico, pode substituir cátions inorgânicos permutáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e Na^{+}) presentes na superfície de alguns argilo-minerais. Esta substituição proporciona análise das estruturas superficiais das partículas em questão. Esse teste é muito utilizado para apontar materiais deletérios presentes na superfície das partículas que possam vir a prejudicar agregados para concretos e argamassas (BELLEW, 2001; YUKSELEN; KAYA, 2008).

3.6. Concreto Permeável

3.6.1. Definição

O concreto permeável ou concreto drenante é uma tecnologia utilizada principalmente para gerir o escoamento e recolhimento de águas pluviais. Os meios de captação de água pluvial das cidades atuais foram projetados em anos anteriores, e hoje já não são adequadas para as condições climáticas recentes. O termo “*sponge city*” (cidade esponja) vem sendo utilizado em referência à projetos que visam a sustentabilidade hídrica de cidades por meio da utilização de concreto permeável, propiciando uma nova abordagem para a gestão urbana de água pluvial (HONG, 2021).

O crescimento desenfreado da população, principalmente junto aos grandes centros urbanos, alinhado ao amplo uso de pavimentos impermeáveis, ratificam a importância da utilização deste tipo de concreto, com potencial para melhorar significativamente a gestão de águas pluviais por meio de drenagem; além de suprir a necessidade de evacuação e condições de escoamento adequadas (CABELLO et al., 2015). Segundo Magesvari (2013), o concreto permeável pode ser utilizado para estradas de baixo tráfego, acostamentos, calçadas e estacionamentos.

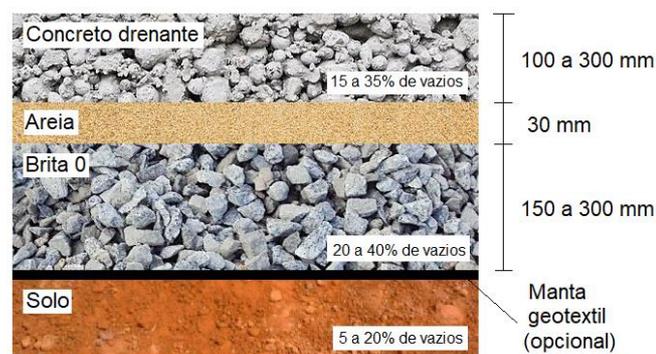
Paralelamente a estes fatores, o rápido desenvolvimento de vias urbanas e a maior utilização de automóveis, acarreta em ruídos provenientes dos veículos que prejudicam o conforto sonoro da população que reside dentro das cidades ou perto de rodovias. O concreto permeável com suas vastas redes de poros interconectados pode ser usado para mitigar este problema (ZHANG et al., 2020).

Os concretos permeáveis consistem em matrizes cimentícias de alto desempenho, contendo cerca de 15 a 25% mais poros que um concreto denso convencional, e geralmente são considerados ecologicamente corretos. O fato desse tipo de concreto ser considerado um meio alternativo que contribui para a sustentabilidade, se deve à sua contribuição gerindo e mitigando o escoamento inadequado de águas pluviais (WANG et al., 2019).

A ideia da utilização de um concreto permeável para drenagem de águas pluviais, parte do princípio de que a macroestrutura de uma matriz cimentícia convencional no estado endurecido contém uma quantidade significativa de poros. Ao majorar essa rede de poros, aumentando-os e interconectando-os, pode-se produzir um concreto capaz de drenar a água, proporcionando vantagens como reabastecimento de lençóis freáticos, controle de inundações urbanas, além de filtragem de partículas sólidas em suspensão com alto potencial de poluição (CARMICHAEL et al., 2021).

Kia et al. (2017) demonstraram um típico sistema de instalação de pavimentos compostos por concreto permeável. Este consiste em uma camada superior de concreto permeável, acompanhada de agregado miúdo na camada de nivelamento, agregado graúdo na sub-base e por fim o solo no subleito (Figura 9). O número e tamanho de cada camada pode variar de um projeto para o outro.

Figura 9: Seção transversal de um sistema de drenagem composto por concreto permeável.



Fonte: Autor (2023).

3.6.2. Características

Um desafio que limita a utilização de concretos permeáveis é a baixa resistência mecânica, relacionada ao grande teor de poros na microestrutura destes sistemas (WANG et al., 2019). Em concretos convencionais para uso geral, a resistência à compressão geralmente varia entre 17 a 40 MPa, enquanto em concretos permeáveis estes valores variam de 2,8 a 28 MPa (ACI 522, 2010). Segundo Mehta e Monteiro (2014), valores de resistência à compressão de concretos permeáveis aos 28 dias, geralmente variam de 3,5 a 28 MPa, sendo 17 MPa um valor médio típico, embora esse parâmetro não seja usado para controle de qualidade. Assim, especialistas na área tem se dedicado a obter novas tecnologias que possam majorar tal resistência, com uso de materiais e aditivos que proporcionem adequabilidade de mesmo (HUANG et al., 2010).

Ao estudar a influência do teor de agregado fino e graúdo nas propriedades de resistência mecânica e permeabilidade do concreto permeável, Maguesvari (2013) percebeu que a angularidade das partículas de ambos os agregados influencia diretamente. Como esperado, um agregado graúdo com pouca angularidade, resulta em uma maior resistência à compressão, à flexão e à tração. Contudo, um agregado graúdo com uma angularidade maior, apesar de proporcionar à matriz menor resistência mecânica, gera um maior volume de poros, logo, um coeficiente de permeabilidade mais adequado.

Um concreto permeável normalmente é fabricado com pouca ou nenhuma adição de agregados miúdos para que se tenha um teor de poros ótimo (CARMICHAEL et al., 2021). Contudo, Wang et al. (2019) perceberam que, ao incorporar um fino de procedência pozolânica (cinza volante) em uma mistura de concreto permeável, pode-se obter resultados de resistência mecânica satisfatórios.

A sílica ativa é um tipo de adição mineral que, ao ser incorporada, contribui formando silicato de cálcio hidratado na zona de transição da microestrutura da matriz cimentícia majorando a resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O fato de geralmente existir microfissuras na zona de transição de concretos permeáveis corrobora com a ideia que a sílica ativa pode contornar o problema de baixa resistência mecânica deste tipo de concreto (YANG; JIANG, 2003; CHEN et al., 2013; KIA et al., 2017).

Yang e Jiang (2003), estudando as propriedades de materiais de pavimentação de concreto permeável, salientaram que o problema de baixa resistência mecânica deste tipo de concreto pode ser contornada com o uso de materiais finos e superplastificantes. Os pesquisadores perceberam que, microfissuras presentes na zona de transição dos agregados graúdos da pasta de cimento endurecida corroboram para uma menor resistência mecânica. Entretanto, ao incorporarem sílica ativa, perceberam que esta zona de transição foi reduzida, diminuindo a quantidade de microfissuras, logo, aumentando tal resistência.

Paralelamente a isso, avaliando a substituição de cimento por nano cinzas volantes em concretos permeáveis, Carmichael et al. (2021) perceberam que a substituição de até 40% de cimento pelo fino, proporcionou um ganho de resistência à compressão, mostrando assim a importância de materiais pozolânicos em uma mistura.

Outro problema que acarreta uma menor resistência mecânica do concreto permeável, é que o mesmo conta com uma quantidade reduzida de cimento, isso gera uma baixa resistência e durabilidade quando comparado ao concreto convencional, fazendo com que o mesmo não seja propício para utilização em locais e ambientes desfavoráveis, como em tráfego intenso e clima frio, por exemplo (CHEN et al., 2013). Contudo, este cenário pode ser revertido com a utilização e proporcionamento adequado dos materiais constituintes. O uso de sílica ativa e superplastificantes, como mencionado, aumentam de forma considerável a resistência mecânica do concreto permeável (YANG e JIANG, 2003).

Alguns estudos da área também utilizam de incorporações de finos inertes para a fabricação de concreto permeável. AoYang Li et al. (2021) por exemplo, mostraram que a incorporação de até 20% de pó de vidro residual acarretou ao concreto drenante, propriedades que atenderam as faixas mínimas exigidas pela norma vigente, no que se diz respeito à resistência mecânica e permeabilidade.

Deste mesmo modo, De Moura et al. (2021), seguindo as orientações normativas da ACI 522 (2010) e da ABNT, também comprovaram a eficácia do pó de vidro para concretos permeáveis. Os pesquisadores salientaram que foi possível obter características similares aos concretos drenantes fabricados com materiais pozolânicos

Kevern et al. (2008a, 2010) ressaltaram que outra forma de conseguir uma resistência mecânica adequada, para uma rede de poros suficientemente aberta e ótima permeabilidade, é com a incorporação de areia. Esta incorporação proporciona à mistura, segundo os pesquisadores, aumentos significativos de resistência devido ao efeito de preenchimento que estas partículas de tamanhos menores proporcionam à mistura, além de melhorarem a trabalhabilidade e durabilidade, sem prejudicar a permeabilidade.

3.6.3. Dosagem - Materiais e caracterizações

Concretos permeáveis normalmente são compostos de água, cimento e agregado graúdo, contendo pouco ou, na maioria das vezes, nenhum agregado miúdo. A elevada porosidade dos agregados de maior granulometria, e os volumes causados por sua incorporação sem a presença de agregados finos para empacotá-los, proporciona um volume de poros mais evidente, permitindo que a água percole com mais facilidade, propiciando melhor infiltração (CARMICHAEL et al., 2021).

Mehta e Monteiro (2014) abordaram faixas típicas de proporcionamento dos componentes do concreto permeável, a fim de se obter um equilíbrio adequado entre o volume de pasta e o teor de vazios, conforme demonstrado na Tabela 1. Por meio destas faixas, é possível adquirir comportamento e desempenho adequado no que se diz respeito a resistência mecânica e trabalhabilidade.

Tabela 1: Proporcionamento dos componentes do concreto permeável.

| Materiais | Proporção kg/m³ |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Materiais cimentícios | 270 a 415 |
| Agregado | 1190 a 1480 |
| Relação água/cimento | 0,27 a 0,34 |
| Relação agregado/cimento | 4 a 5,5 |
| Relação agregado miúdo/agregado graúdo | 0 a 1 |

Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

A seleção dos agregados para misturas de concreto drenante, se dá normalmente por caracterização da uniformidade dos grãos e pelo coeficiente de curvatura. Segundo Yahia e Kabagire (2014), uma seleção de agregados graúdos é

fundamental para proporcionar à mistura propriedades características deste tipo de concreto.

Seguindo nesta linha, Chen et al. (2013) relataram que as composições dos agregados de um concreto permeável devem conter partículas uniformes por parte dos agregados graúdos, com pouca ou nenhuma areia (agregado miúdo). A pasta de cimento, que consiste em uma quantia cuidadosamente controlada, envolve os grãos do agregado, unindo as partículas presentes e deixando uma quantidade significativa de macro-vazios (poros) interconectados. Assim, o concreto permeável torna-se altamente permeável obtendo uma taxa de fluxo de água em torno de até 0,34 cm/s.

Embora a produção do concreto permeável seja com pouco ou nenhum agregado miúdo (ou materiais mais finos de maneira geral), estes podem ser incorporados eventualmente para proporcionar ganho de resistência mecânica, caso seja necessário. Ibrahim et al. (2020) mostraram que, ao incorporarem 10% de areia em uma mistura de concreto permeável, com relação água/cimento de 0,3 a 0,4, houve 12% de redução dos poros e, conseqüentemente, ganho na resistência de 50%, em comparação à mistura referência sem areia. Os autores mostraram também que o ganho de resistência se deve, além da menor porosidade, pelo melhor intertravamento que a areia proporciona aos agregados graúdos.

Xie et al. (2019) salientaram que a umidade presente nos agregados graúdos deve ser monitorada com atenção, uma vez que o excesso de umidade proporcionado por esta água, acompanhada com a água já existente na mistura, podem afetar negativamente o desempenho da mistura de concreto permeável. Os pesquisadores orientaram a realização do teste de peso unitário para o controle desta propriedade.

O alto teor de agregados graúdos constituinte na mistura é o principal responsável por proporcionar ao concreto permeável uma superfície rugosa. Esta característica proporciona a redução significativa de lâminas d'água ocasionadas inconvenientemente por precários projetos ou execuções de pavimentação e escoamento de estacionamentos e vias públicas, além de reduzir também ruídos gerados pelo trânsito de automóveis (CABELLO et al., 2015).

Alshareedah e Nassiri (2021), buscando alcançar um projeto de mistura adequado para equilibrar porosidade, permeabilidade e propriedades mecânicas adequadas,

fixaram uma dosagem típica das pesquisas atuais na faixa de 1:(4 – 4,5):(0,38 – 0,35), sendo essa relação em massa de cimento: agregado: água, atendendo assim os requisitos de desempenho estrutural e hidrocópico exigida pela ACI 522 (2010) (Tabela 2). O proporcionamento sugerido pela norma foi elaborado por um método de tentativa e erro, misturando teste de campo com projetos, até que as propriedades desejadas sejam alcançadas. (KEVERN et al., 2008; ACI 522-R10, 2010; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016; RANGELOV et al., 2017).

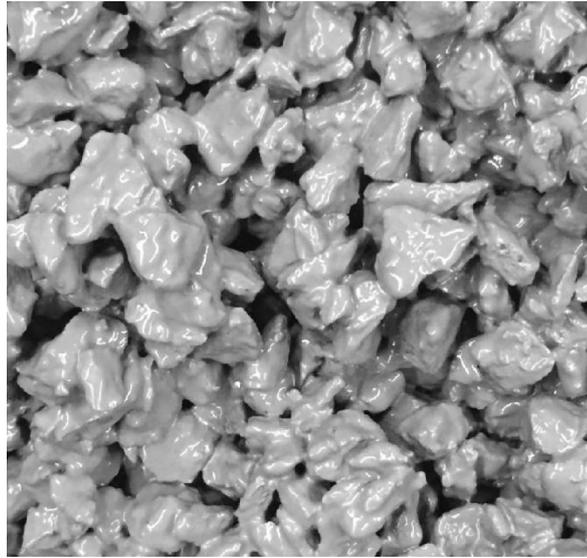
Para essa proporção, a utilização de agregados grossos com tamanho relativamente uniformes, e o baixo volume de pasta de cimento, que tem função apenas de unir os agregados, proporciona à mistura a formação de poros interconectados que, por sua vez, propiciam à mistura melhor permeabilidade. Na Figura 10 observa-se uma mistura em estado fresco, nota-se que a reduzida quantidade de pasta é suficiente para unir os agregados, formando os poros (ALSHAREEDAH, NASSIRI; 2021).

Tabela 2: Proporções do concreto permeável e seus componentes típicos.

| Material | Valores Típicos |
|-----------------------------------------------|------------------------|
| Cimento (kg/m ³) | 280 a 310 |
| Agregado grosso (kg/m ³) | 1.440 a 1.800 |
| Agregado fino (opcional) (kg/m ³) | 85 a 205 |
| Relação água/cimento (a/c) | 0,26 a 0,45 |
| Relação agregado/cimento | 4: 1-4,5: 1 |
| Dimensão do agregado grosso (mm) | 2,38 a 19 |
| Porosidade no estado endurecido (%) | 15 a 15 |
| Resistência à compressão (MPa) | 2,8 a 28 |
| Permeabilidade (cm/s) | 0,14 a 1,22 |

Fonte: ACI 522 - R10 (2010).

Figura 10: Mistura de concreto permeável no estado fresco.



Fonte: Alshareedah e Nassiri (2021).

No entanto, Kia et al. (2017) explanaram que não existe de fato um proporcionamento que atenda todas as demandas das características adequadas de um concreto permeável. A dosagem pode variar de um projeto para o outro, a depender do objetivo final do pavimento. Para a elaboração dos procedimentos da pesquisa dos autores, por exemplo, foi feito um proporcionamento diferente das utilizadas por Alshareedah e Nassiri (2021), demonstrado na Tabela 3. Proporcionamento este que seguiu a literatura de vários outros projetos (CROUCH et al., 2006; WANG et al., 2006; SUMANASOORIYA et al., 2012; SONEBI; BASSUONI, 2013; IBRAHIM et al., 2014).

Tabela 3: Dosagem de concreto permeável adaptados da ACI 522 - R10.

| Material | Proporções |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| Cimento (kg/m ³) | 150 a 700 |
| Agregado grosso (kg/m ³) | 1100 a 2800 |
| Agregado fino (opcional) (kg/m ³) | 0 a 100 |
| Relação água/cimento (a/c) | 0,2 a 0,5 |
| Relação agregado/cimento | 2 a 12 |
| Relação agregado miúdo/agregado graúdo | 0 a 0,07 |

Fonte: Kia et al. (2017).

Alguns estudos relataram que a redução da relação agregado/cimento aumenta a resistência mecânica do concreto permeável, devido à redução dos poros que são preenchidos por uma maior quantidade de fino (neste caso, o cimento) e também por produzir um maior volume de pasta (LIU et al., 2019; XU et al., 2020; DAI et al., 2020).

Pode-se considerar um consenso o fato de que diminuir a relação a/c aumenta a resistência mecânica do concreto devido à porosidade reduzida. (LIU et al., 2019 ; XU et al., 2020 ; DAI et al., 2020). Contudo, observou-se em outras pesquisas que a relação a/c dentro de um intervalo de 0,28-0,35 resulta em maior resistência à compressão, isso se deve ao fato que, uma menor quantidade de água na mistura pode não hidratar o cimento de forma eficiente para que o processo de hidratação, assim um pequeno aumento da a/c pode diminuir a porosidade e aumentar a resistência mecânica (SONEBI; BASSUONI, 2013; IBRAHIM et al., 2014) .

Entretanto, entende-se que a redução dos poros em um concreto permeável não é interessante, visto que a boa permeabilidade do mesmo depende de um maior teor de poros interconectados adequado (SONEBI; BASSUONI, 2013; IBRAHIM et al., 2014).

Em relação aos aditivos químicos, geralmente são utilizados em concretos permeáveis pelas mesmas razões que são utilizados em concretos convencionais, são eles: retardadores de pega, que são usados para estenderem o tempo de trabalhabilidade por meio da diminuição da hidratação do cimento e da redução do calor excessivo gerado nas primeiras idades, além de serem usados também como lubrificantes, melhorando manuseio e o desempenho no local de aplicação; aditivos redutores de água de média e de alta eficiência dependendo do teor de água/materiais cimentícios; além de incorporadores de ar em caso de aplicações em regiões sujeitas a gelo e degelo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os superplastificantes podem ser utilizados para contornar o problema de baixa resistência mecânica (YANG; JIANG, 2003). Além disso, segundo Lamb (2014), os superplastificantes também podem contribuir majorando a trabalhabilidade e tempo de pega.

Kia et al. (2017) relataram a importância do uso de superplastificantes em misturas de concreto permeável. Eles são responsáveis pela melhor distribuição da pasta de cimento, tornando a mistura mais homogênea, revestindo os agregados de maneira mais adequada e evitando o endurecimento precoce na superfície inferior. Como a pasta de cimento é a principal responsável pela resistência mecânica do concreto permeável, medidas que contribuam com sua adesão aos agregados são fundamentais.

Em relação às adições incorporadas em concreto permeável, Khankhaje et al. (2023), ao incorporarem cinza volante em uma mistura de concreto permeável como substituto parcial do cimento, perceberam que houve uma redução da resistência inicial do concreto permeável, muito provavelmente pelo fato da redução da pasta de cimento. Além disto, houve também redução da capacidade drenante do concreto, uma vez que a presença de cinza volante acarretou em atividades pozolânicas que, por sua vez, criaram géis secundários de C-S-H, reduzindo o volume de vazios da mistura.

3.7. Fabricação de peças de concreto para pavimentação – pavers

A produção de peças de concreto para pavimentação (pavers ou blocos intertravados) envolve as seguintes etapas: Proporcionamento dos materiais, mistura, moldagem por meio de vibro-prensa e cura das peças (OLIVEIRA, 2004). O processo de vibro-prensagem é uma etapa fundamental para o desempenho das peças de concreto pré-moldadas, uma vez que o concreto utilizado na fabricação provém de baixa quantidade de água (RODRIGUES, 1995).

3.7.1. Vibro prensa hidráulica

Uma máquina de vibro prensagem (Figura 11) geralmente é constituída pelas seguintes partes: Silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão, forma e sistema de vibração. O sistema utilizado para confecção das peças é dotado de compressão e vibração, simultaneamente. (RODRIGUES, 1995).

Figura 11: Máquina de vibro prensa.

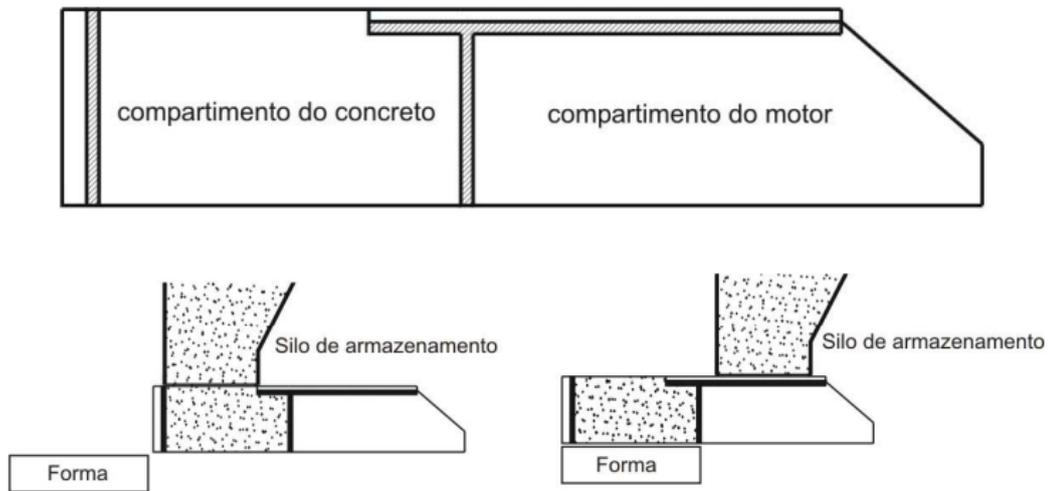


Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, antes da mistura alcançar o silo de armazenamento, esta será produzida no misturador. Os misturadores recebem os materiais constituintes da mistura (água, cimento e agregados) de forma manual por meio de um sistema de computadores, e então, de forma automática, cada um dos componentes é direcionado ao misturador. Após a mistura atingir a trabalhabilidade ideal (esta será de acordo com o material que será produzido), a mesma sai do misturador e se encaminha para o silo de armazenamento por meio de uma esteira (RODRIGUES, 1995).

A gaveta é um compartimento móvel, que tem a função de receber a mistura do silo de armazenamento, e destina-lo à forma. Esta é composta por dois compartimentos, o compartimento do motor e o compartimento do concreto (Figura 12). A gaveta ainda possui alguns dispositivos fundamentais para o seu funcionamento, são eles: Conjunto de agitadores, que tem a função de revolver o material facilitando o preenchimento da forma; o raspador da forma, com finalidade de remover o excesso de material e o raspador das sapatas, que tem como objetivo limpar as sapatas (local onde molda-se as peças) no momento do retorno da gaveta (OLIVEIRA, 2004).

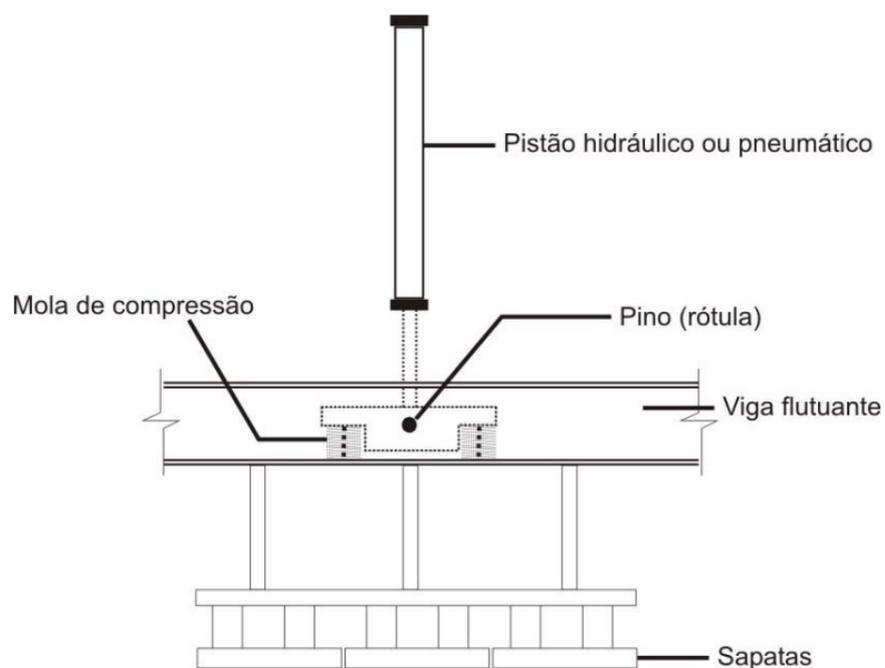
Figura 12: Gaveta recebendo o material do silo de armazenamento e destinando à forma.



Fonte: Oliveira (2004).

O silo de compressão é o sistema responsável por aplicar as cargas no concreto no momento da moldagem. Este, normalmente, é constituído pelas seguintes partes: Sapatas, vigas flutuantes e pistão hidráulico ou pneumático (Figura 13).

Figura 13: Partes constituintes de uma vibro presa.



Fonte: Oliveira (2004).

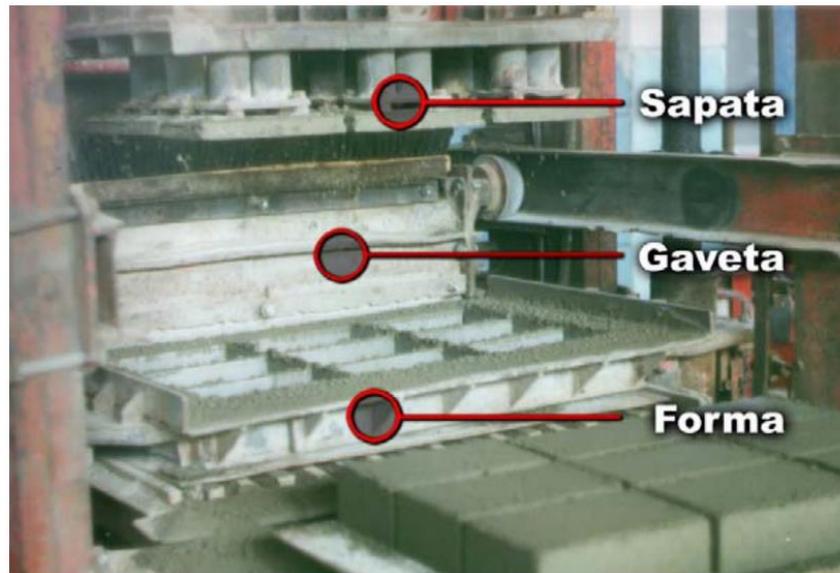
Todo o sistema de compressão está situado acima das sapatas, sendo estas localizadas na parte inferior. Tem função de transferir a carga da viga flutuante para o concreto. A fim de diminuir seu desgaste, as sapatas normalmente são fabricadas com material de maior dureza, tratados termicamente. Nas máquinas mais modernas, as sapatas podem ser dotadas de aquecimento, evitando que o concreto fique aderido na superfície, reduzindo assim as constantes paradas para limpeza (OLIVEIRA, 2004).

As vigas flutuantes são geralmente formados por perfis “Us” fixados nas extremidades laterais. Em alguns tipos de vibro prensa, a viga flutuante é a única responsável por aplicar as cargas no concreto por meio do seu peso próprio (PIROLA, 2012).

O pistão hidráulico (ou pneumático) tem como maior função suspender a viga flutuante, sendo que, em alguns casos, pode também auxiliar na aplicação das cargas junto à viga flutuante, podendo tornar essa força consideravelmente mais forte. Quando a força é aplicada somente pelo conjunto da viga flutuante com as sapatas, o carregamento varia entre 0,5 a 1,0 kg/cm². Quando há auxílio do pistão hidráulico (ou pneumático), o carregamento varia entre 2,0 a 3,0 kg/cm² (OLIVEIRA, 2004).

Também conhecida como molde, a forma tem a função de definir as características geométricas da peça a ser produzida, podendo variar, a depender do tipo de molde escolhido para fabricação, sendo que recomenda-se emprego de largura inferior a 50,0 centímetros no sentido frente-fundo, afim de se evitar problemas de preenchimento (PAGE, 1998). Observa-se na Figura 14 as sapatas, a gaveta e a forma, esta que, por sua vez, está sendo utilizada para fabricar peças prismáticas.

Figura 14: Sapata, gaveta e forma de uma vibro prensa.



Fonte: Oliveira (2004).

Considerado uma das partes mais importantes do sistema de fabricação de uma vibro prensa, o sistema de vibração influencia em propriedades importantes como a resistência mecânica do material, uma vez que, a vibração fluidifica a argamassa e seus componentes, diminuindo o atrito interno e acomodando melhor os agregados (NEVILLE, 1997).

Os parâmetros envolvidos com o sistema de vibração são: direção, visto que diferentes sentidos podem ser adotados a depender do tipo de material e tipo de vibro presa em uso; frequência, esta que é dada pelo número de ciclos na unidade de tempo, sendo geralmente indicada em Hertz (variam entre 40 e 80 Hertz); amplitude, que está relacionada com o deslocamento máximo de um ponto ao outro, em relação a sua posição média inicial (BRESSON, 2001).

Oliveira (2004) ainda mostra que, o tempo de vibrocompressão varia em torno de 6,0 segundos, sendo este o grande responsável pela compactação do material fabricado. Quanto maior for este tempo, maior será a quantidade de concreto vazado nas formas, tornando assim a peça mais compacta, reduzindo o seu volume de vazios e influenciando diretamente na resistência final do produto

4. ABORDAGEM METODOLÓGICA

4.1. Materiais

Para este estudo foram produzidos blocos de concreto intertravados (pavers) permeáveis em escala industrial, em uma fábrica de pré-moldados.

Os materiais utilizados para a fabricação dos pavers foram os seguintes:

- Cimento Portland CPV-ARI, com caracterização disponibilizada pelo fabricante apresentada na Tabela 4 e massa específica igual a 3,17 kg/dm³.

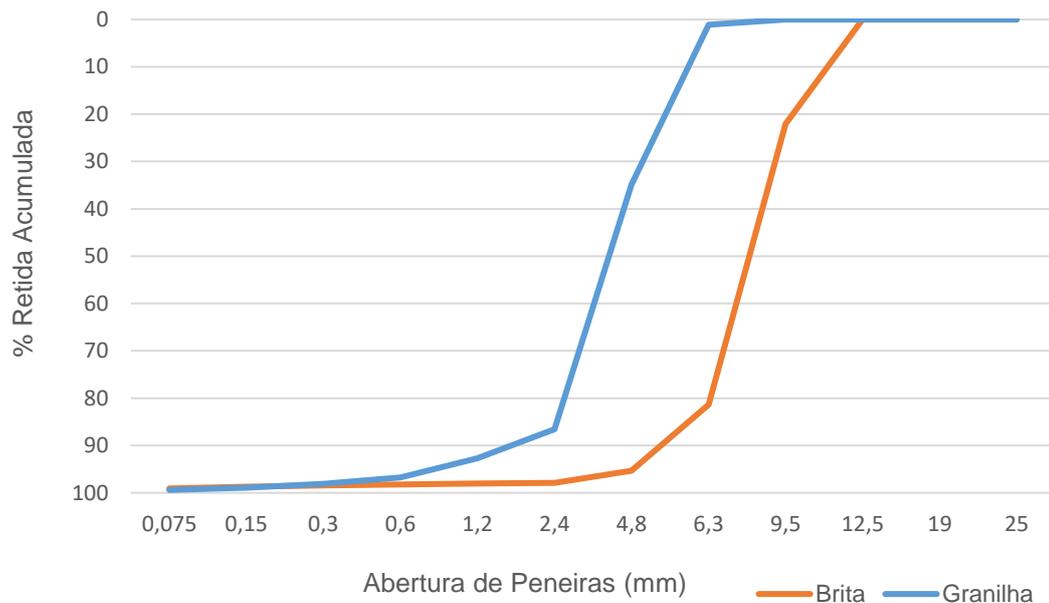
Tabela 4: Laudo do cimento utilizado para as misturas.

| Ensaio Químicos | | | | | |
|--------------------------|--------------|--------------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| Ensaio | NBR nº | Unidade | Média | Especif. NBR 16697:18 | |
| PF 950 C | NM 18/12 | % | 9,05 | ≤ 12,50 | |
| SO ₃ | NBR 14656/01 | % | 3,11 | ≤ 4,50 | |
| RI | NM 22/04 | % | 2,41 | ≤ 7,50 | |
| CaOI | NM 13/13 | % | 1,41 | não aplicável | |
| MgO | NBR 14656/01 | % | 1,26 | não aplicável | |
| Ensaio Físicos | | | | | |
| Ensaio | NBR nº | Unidade | Média | Especif. NBR 16697:18 | |
| Blaine | NBR 16372:15 | cm ² /g | 5159,00 | não aplicável | |
| Ret. 75 mic | NBR 11579:13 | % | 0,20 | ≤ 10,00 | |
| Ret. 45 mic | NBR 12826:14 | % | 0,60 | não aplicável | |
| IP | NBR 16607:18 | min | 139,00 | ≥ 60,00 | |
| Espansib LeCh | NBR 11582:16 | mm | 0,00 | ≤ 5,00 | |
| FP | NBR 16607/18 | min | 183,00 | não aplicável | |
| Resistência à Compressão | | | | | |
| Ensaio | NBR nº | Unidade | Desvio | Média | Especif. NBR 16697/18 |
| Resist. Comp. 1D | NBR 7215:19 | MPa | 0,69 | 22,6 | não aplicável |
| Resist. Comp. 3D | NBR 7215:19 | MPa | 1,11 | 30,5 | ≥ 15,00 |
| Resist. Comp. 7D | NBR 7215:19 | MPa | 0,74 | 36,5 | ≥ 25,00 |
| Resist. Comp. 28D | NBR 7215:19 | MPa | 0,23 | 43,3 | ≥ 40,00 |

Fonte: CSN Cimentos (2022).

- Agregados: Agregado graúdo gnáissico 4,75/12,5 mm (Brita 0), e granilha gnáissica (dimensão máxima característica de 6,3 mm), com massas específicas iguais a 2,77 g/cm³ e 2,75 g/cm³, respectivamente. A distribuição granulométrica dos agregados pode ser observada na Figura 15.

Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Autor (2023).

- Resíduos provenientes do corte de rocha ornamental via tear de fios diamantados, dos tipos mármore e granito. A caracterização dos resíduos será apresentada no tópico de Resultados.

4.2. Estudo piloto

Foi realizado um estudo piloto para a mistura referência, contendo apenas cimento, para definir um teor ótimo de agregado graúdo em função da composição granulométrica e índice de vazios (15 a 35%), seguindo as recomendações da ACI 522 (2010).

Inicialmente foi testado uma mistura referência já utilizada pela empresa de pré-moldados onde os pavers foram produzidos. Entretanto, o proporcionamento não apresentou propriedades permeáveis satisfatórias, embora tenha apresentado alta resistência à compressão, 35 MPa, aos 28 dias. A Tabela 5 apresenta o traço inicial,

que foi posteriormente adaptado, após os testes de permeabilidade acusarem capacidade drenante nula.

Tabela 5: Traço inicial (descartado) para 1,0 m³ de concreto.

| Traço | Cimento (kg) | Brita 0 (kg) | Granilha (kg) | Areia (kg) | Água (kg) |
|------------|--------------|--------------|---------------|------------|-----------|
| Descartado | 355 | 230 | 1015 | 230 | 30 |

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 16 observa-se um teste de infiltração preliminar, realizado para testar a capacidade drenante dos CPs fabricados com esse traço inicial. Percebe-se que a peça está visualmente muito compacta. Foi aplicado água na parte superior do CP, com o intuito de confirmar sua capacidade drenante. Entretanto, percebeu-se que maior parte da água percolou pela lateral do paver (vermelho), e pouca de fato passou pelos poros interconectados da peça (azul).

Figura 16: CP confeccionado com traço piloto, com baixa permeabilidade.



Fonte: Autor (2023).

Assim, com base na literatura citada neste trabalho, foi elaborado um novo traço para que as principais propriedades do concreto permeáveis fossem alcançadas simultaneamente: porosidade, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à abrasão. O traço proposto encontra-se capítulo 4.3, proporcionamento das misturas. Durante esse estudo preliminar, também se observou que o tempo de vibroprensagem necessário para fabricar as peças era de, aproximadamente, 10 segundos.

4.3. Proporcionalamento das misturas

Para o concreto drenante é usual dispensar o uso de agregados miúdos, uma vez que esses podem interferir fortemente nas suas características permeáveis, reduzindo a quantidade e o tamanho dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014; CARMICHAEL et al., 2021; ALSHAREEDAH, NASSIRI, 2021). Para definição do teor de água, verificou-se a umidade por meio de um procedimento empírico chamado “ponto de pelota”. O procedimento consiste em adicionar água gradualmente até que a mistura consiga ser moldada manualmente, mantendo a coesão (sem esfarelar), conforme metodologia apresentada por Matos et al. (2019). Na Figura 17 tem-se um concreto no ponto de pelota.

Figura 17: Ponto de pelota.



Fonte: Matos et al. (2019).

Para a definição do consumo de cimento, buscou-se um fpk mínimo de 20,0 MPa, para adequação à NBR 16416 (ABNT, 2015) (pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos).

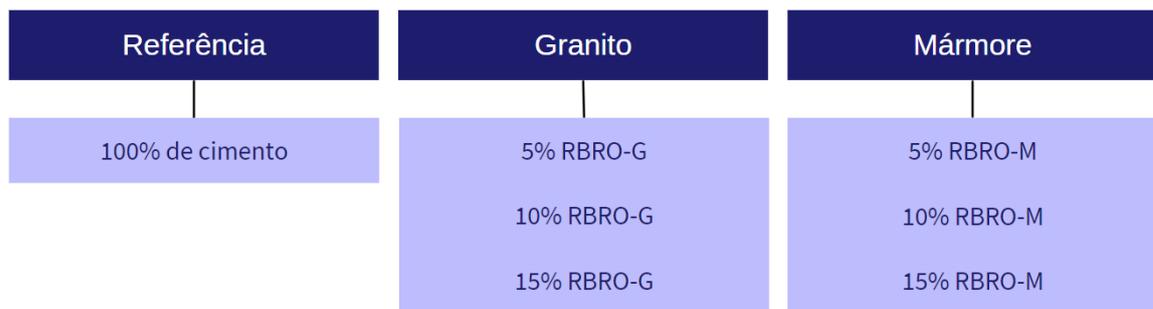
Com isso, pode-se obter o proporcionalamento das misturas apresentado na Tabela 6. Foram produzidas 7 composições de pavers drenantes, cada um contendo um teor de substituição (em volume) de cimento Portland pelo RBRO (granito e mármore), a saber: 0, 5, 10 e 15% (Figura 18).

Tabela 6: Proporcionamento das misturas para a produção 1 m³ de concreto.

| Traço | Cimento (kg) | Brita 0 (kg) | Granilha (kg) | RBRO (kg) | Água (kg) |
|------------|--------------|--------------|---------------|-----------|-----------|
| Referência | 323 | 577 | 1154 | 0 | 67 |
| 5% RBRO-G | 307 | | | 14 | |
| 10% RBRO-G | 291 | | | 28 | |
| 15% RBRO-G | 275 | | | 42 | |
| 5% RBRO-M | 307 | | | 14 | |
| 10% RBRO-M | 291 | | | 28 | |
| 15% RBRO-M | 275 | | | 42 | |

Fonte: Autor (2023).

Figura 18: Fluxograma das misturas produzidas.



Fonte: Autor (2023).

4.4. Métodos

A fabricação dos pavers foi realizada em escala real, em fábrica de pré-moldados, por meio do processo de vibro prensa “multicamadas”, máquina modelo FDA Evo (Figura 19), com um tempo de vibração/compactação médio de 10 segundos (± 2 s) para 6 das 7 amostras, sendo que para a mistura com 15% de RBRO-M, houve a necessidade de manter a vibrocompressão por 14 segundos (± 2 s). Esse aumento no tempo de vibrocompressão foi necessário para permitir a moldagem dos pavers, visto que com o tempo de 10 s as amostras não ficaram com a coesão necessária (não passavam no teste do ponto de pelota). A dimensão dos pavers produzidos foram de 10,0 cm de largura, 20,0 cm de comprimento e 8,0 cm de altura com desvio padrão de 3,0 mm. Todas as misturas foram executadas no mesmo dia, sob as mesmas condições da fábrica.

Figura 19: Vibro-prensas "multicamadas" EVO.



Fonte: Autor (2023).

4.4.1. Ensaios

Foram realizados ensaios tecnológicos nas misturas produzidas. No estado fresco, foi realizada uma avaliação qualitativa da trabalhabilidade, baseada na capacidade de moldagem dos pavers durante a sua fabricação (ponto de pelota), apenas para determinar se a umidade da mistura estava adequada para moldagem, não havendo resultado a ser apresentado. Já no estado endurecido, foram coletados 30 pavers por traço fabricado, que foram submetidos aos ensaios de massa específica, teste de porosidade (ASTM C1754, 2012), permeabilidade (NBR 16416, ABNT 2015), resistência à compressão (NBR 16416, ABNT 2015) e resistência à abrasão (NBR 12042, ABNT 2012).

Na Figura 20 tem-se o fluxograma das variáveis de resposta da pesquisa, apresentando os meios de caracterização dos resíduos, ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

Figura 20: Variáveis de resposta.



Fonte: Autor (2023).

4.4.1.1. Massa específica aparente

A massa específica no estado fresco não pode ser realizada nos corpos de prova, pela impossibilidade de movimentação dos pavers logo após a mistura. Portanto, foi realizada no estado endurecido. Para cada concreto, 6 unidades foram medidas e pesadas, para o cálculo da massa específica no estado endurecido.

4.4.1.2. Porosidade

A porosidade do concreto permeável no estado endurecido foi determinada baseando-se na norma ASTM C1754 (2012), com adaptações apresentadas por Neithalath et al. (2010) e Sandoval et al. (2017).

O teste consiste em, primeiramente pesar e registrar a massa do corpo de prova seco, depois cobri-lo com filme de PVC e posteriormente com um cilindro metálico (molde para formar os corpos de prova). Todo o conjunto deve ser pesado novamente, registrando-se a massa. O objetivo do ensaio é aplicar um volume de água conhecido no concreto permeável, até que o mesmo seja saturado com todos os poros preenchidos, o filme de PVC e o molde metálico evitam que a água escape. Então, leva-se em consideração a diferença de massa da amostra seca e saturada, obtendo assim o volume de vazios do concreto permeável, logo, sua porosidade.

Entretanto, como os corpos de prova utilizados no trabalho são paralelepípedicos, foi necessário utilizar silicone acético, com o objetivo de vedar todos os poros periféricos e impedir qualquer escapamento de água durante a execução do ensaio.

Para a realização do ensaio, 03 corpos de prova de cada mistura foram submetidos aos ensaios de porosidade, com cálculo da média e desvio padrão para determinação do resultado.

A Figura 21 apresenta, um corpo de prova envolvido com silicone acético para a realização do ensaio.

Figura 21: Execução do ensaio de porosidade com silicone acético.



Fonte: Autor (2023).

4.4.1.3. Permeabilidade

A avaliação da permeabilidade foi conduzida de acordo com as prescrições da NBR 16416 (ABNT, 2015), que trata dos procedimentos normativos para testes, fabricação e execução de pavimentos permeáveis. Para a realização deste ensaio, foram necessários os seguintes materiais: Anel cilíndrico de infiltração com 300 mm de diâmetro, balança com resolução de 0,1 g, recipiente com volume mínimo de 3,6 litros, que permita um derramamento controlado da água, cronômetro com resolução de 0,1 segundos, silicone e água limpa.

Para a execução do ensaio, foi construído um sistema de drenagem. Uma cova com aproximadamente 30 centímetros de profundidade foi escavada no solo, e

preenchida com camadas de agregados graúdos com classificação granulométricas de 9,5/19,0 e 19,0/38,0 mm, também chamados comercialmente de brita 1 e brita 2 respectivamente, formando a base e a sub-base. E por fim, areia fina com módulo de finura de 1,74 para a camada de nivelamento. O sistema simulador de drenagem pode ser observado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22: Agregado graúdo utilizado para o sistema simulador de drenagem.



Fonte: Autor (2023).

Figura 23: Sistema simulador de drenagem concluído.



Fonte: Autor (2023).

Foram seguidas a orientação da NBR 16416 (ABNT, 2015) para a realização do ensaio de permeabilidade. Para cada tipo de peça, o ensaio de permeabilidade foi realizado com três amostras diferentes, obtendo-se a média e desvio padrão. Dezesesseis (16) pavers, rejuntados com areia fina, foram dispostos com o intuito de simular um pavimento drenante. O anel cilíndrico, com duas marcações no seu

interior foi colado sobre os pavers com silicone acético, de modo que não permitisse vazamentos que não fosse por dentro do pavimento permeável, conforme observase na Figura 24.

Figura 24: Anel cilíndrico para a execução do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2023).

Com o sistema concluído, o teste foi executado. Este consiste em primeiramente, executar uma pré-molhagem no sistema de 30 segundos. Após a pré-molhagem, despejar controladamente 3,6 litros de água e manter o seu nível dentro das marcações indicativas no interior do anel cilíndrico, marcando o tempo necessário para a completa infiltração, com um cronômetro de resolução 0,1 segundos.

O coeficiente de permeabilidade (K) se dá, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), pela aplicação dos resultados obtidos na lei de Darcy. Este calculado por meio da Equação 1, é a relação entre a capacidade de permeabilidade do pavimento, pelo tempo necessário para a infiltração total da água.

$$K = \frac{C.m}{(d^2.t)} \quad \text{Equação (1)}$$

em que,

k = coeficiente de permeabilidade (mm/h);

C = Fator de conversão de unidade, com valor igual a 4.583.666.000,00;

m = massa de água infiltrada, expressa em quilogramas (kg);

t = tempo necessário para toda a água percolar, expresso em segundos (s);

d = diâmetro interno do cilindro de infiltração expresso em milímetros (mm).

4.4.1.4. Resistência à abrasão

Usualmente, para os ensaios de resistência à abrasão em pavimentos, são utilizados os procedimentos determinados pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Entretanto, o laboratório utilizado para a realização dos ensaios (LEMAC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção) nas dependências da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), não portava do tipo de abrasímetro orientado pela norma. Assim, para mensurar a resistência à abrasão dos pavers permeáveis fabricados neste trabalho, utilizou-se dos procedimentos expostos na NBR 12042 (ABNT, 2012).

Embora os ensaios da NBR 12042 (ABNT, 2012) sejam habitualmente utilizados para avaliar a resistência à abrasão de corpos de prova lisos (rochas ornamentais por exemplo), elaborou-se um procedimento para que os pavers permeáveis pudessem ser testados pelo tipo de abrasímetro apresentado pela norma, em razão da disponibilidade do equipamento.

Foi utilizado um abrasímetro Amsler modelo 100M063 (Figura 25). Para cada mistura foram ensaiados 06 corpos de prova, totalizando 42 amostras.

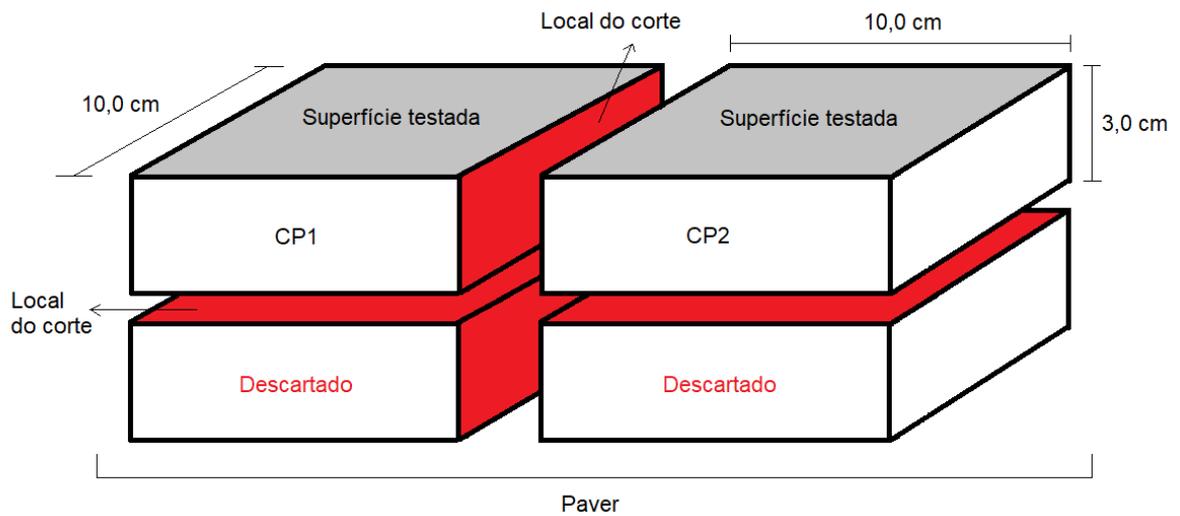
Figura 25: Abrasímetro Amsler modelo 100M063.



Fonte: Autor (2023).

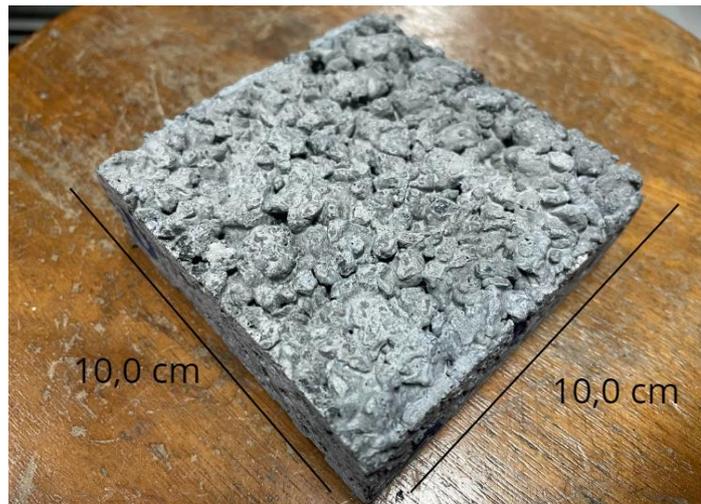
Para viabilizar o ensaio, foi necessário cortar os pavers com disco diamantado, de modo que os corpos de prova tivessem medidas de 10 cm de largura, 10 cm de comprimento e 3 cm de altura, conforme demonstrado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26: Esquema de corte dos pavers.



Fonte: Autor (2023).

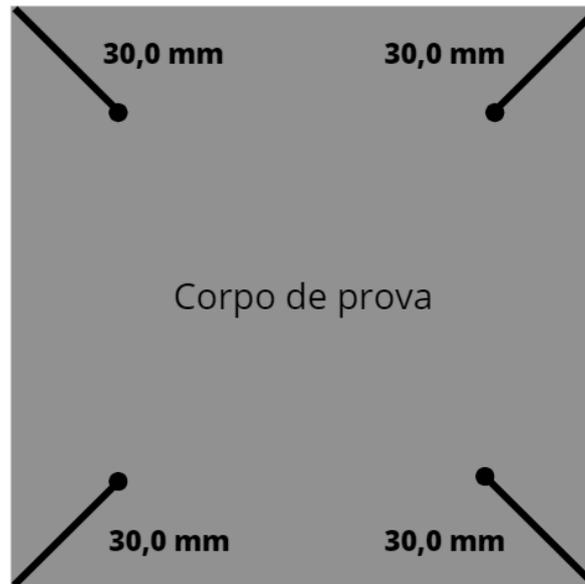
Figura 27: Corpo de prova utilizado para o teste de abrasão.



Fonte: Autor (2023).

Para a execução do ensaio, dois corpos de provas são testados simultaneamente. O primeiro passo é efetuar as leituras das alturas iniciais a 30 milímetros dos vértices (Figura 28), por meio de um relógio comparador. Para otimizar tais medições, foi construído um gabarito de madeira, que tornou os valores obtidos mais confiáveis (Figura 29).

Figura 28: Pontos de medição há 30,0 milímetros dos vértices.



Fonte: Autor (2023).

Figura 29: Medidor com o gabarito construído.



Fonte: Autor (2023).

Após as leituras iniciais, dois corpos de provas são fixados às sapatas de acoplamento do abrasímetro, colocando-os em contato com a pista de rolamento e aplicando uma força de 66 N. Contudo, o modelo da máquina utilizada não conta com um medidor que constate a força empregada. Portanto, os ensaios foram

realizados de modo que todos os CPs estivessem pressionados com a mesma força, tendo como orientação o som emitido pelo atrito entre o CP e a pista de rolamento.

Para a finalização do ensaio, são contabilizadas 500 rotações, sendo que, após a volta de número 250, os corpos de prova são invertidos nas sapatas. Ao término das rotações, efetua-se a leitura final, mensurando assim, por meio da diferença entre a leitura inicial e a final, o desgaste da peça por abrasão.

4.4.1.5. Resistência à Compressão

A resistência à compressão também foi determinada conforme orienta a NBR 16416 (ABNT, 2015). Para este ensaio, os pavers permeáveis testados (Figura 30) estavam saturados em água a $23^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 h e com superfícies retificadas. A máquina utilizada para os rompimentos foi a EMIC, modelo PC200C, e o fpk foi calculado posteriormente à obtenção dos resultados em MPa.

Figura 30: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados de caracterização dos RBROs utilizados e os resultados dos ensaios realizados com os sete tipos de pavers produzidos.

As discussões aqui apresentadas levam em consideração um comparativo entre alguns dos resultados obtidos, no que se diz respeito às principais propriedades deste tipo de concreto, a fim de se entender a relação dessas grandezas com as propriedades intrínsecas de cada um dos materiais envolvidos na fabricação, além da percepção de como influenciarão no comportamento mecânico e hidráulico dos pavers permeáveis.

Foram utilizados resíduos do beneficiamento de rocha ornamental de duas origens mineralógicas: granito (RBRO-G) e mármore (RBRO-M). Ambos são provenientes do processo de corte via tear de fios diamantados, obtidos de um aterro situado na cidade de Cachoeiro do Itapemirim, no Espírito Santo, na forma de lama. Para a caracterização e uso, foi realizada uma secagem em estufa a 100°C por 24 horas, e posteriormente, destorroamento por meio de almofariz de porcelana e peneiramento em peneira de 150 µm.

5.1. Caracterização dos resíduos

5.1.1. Massa específica aparente

A massa específica do RBRO-G foi de 2,73 kg/dm³, enquanto que para o RBRO-M obteve-se uma massa específica de 2,75 kg/dm³.

5.1.2. Área superficial pelo método de Blaine

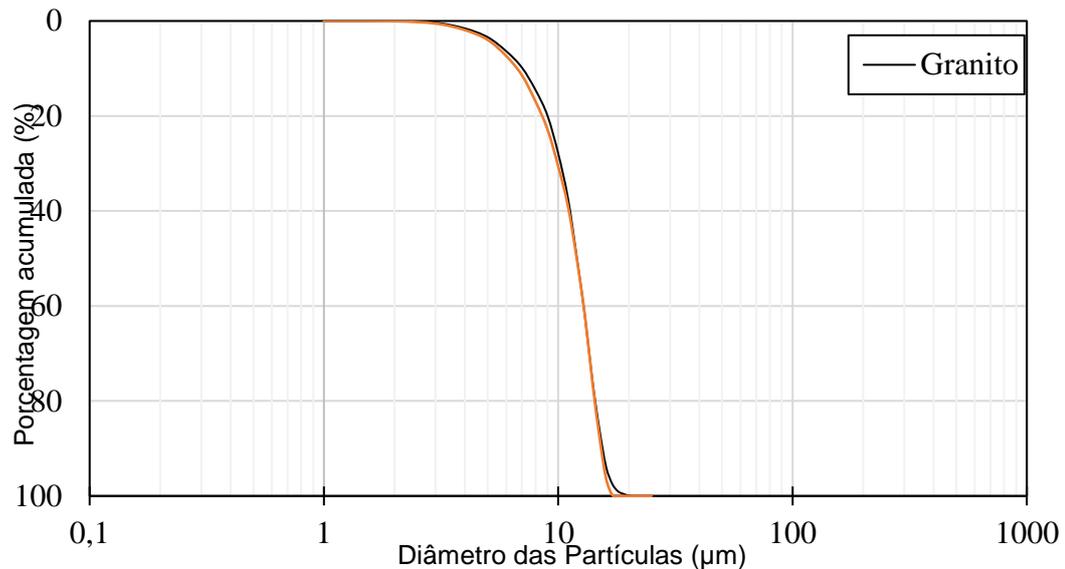
Área superficial Blaine para o RBRO-G foi de 4.021,94 cm²/g, enquanto que para o RBRO-M foi de 6.646,64 cm²/g. Percebe-se que os resíduos apresentam finuras distintas in natura. O resíduo de granito apresenta finura próxima à cimentos atualmente comercializados, enquanto que o de mármore é mais fino.

5.1.3. Granulometria a laser

Foi realizado ensaio de granulometria a laser para os resíduos de mármore e granito, por meio do analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000, via seca. É

possível observar suas curvas granulométricas na Figura 31. As amostras utilizadas para a granulometria a laser possuíam partículas menores que 0,053 mm, pela limitação do equipamento. A porcentagem de material passante na peneira 0,053 mm foi de 19% para granito e de 17% para o mármore.

Figura 31: Distribuição granulométrica dos RBRO-G e RBRO-M.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se similaridade na curva de ambos os resíduos, considerando os grãos menores que 0,053 mm. Em algumas faixas granulométricas o RBRO-M apresenta-se levemente mais fino do que o RBRO-G.

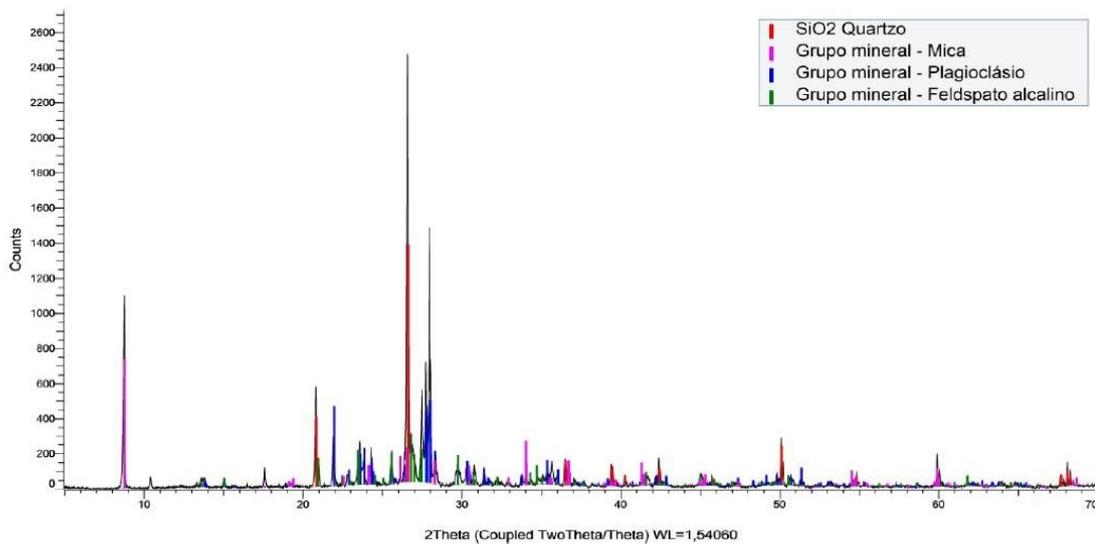
No ensaio de área superficial Blaine, o RBRO-M apresentou maior finura (6.646,64 cm²/g) do que o RBRO-G (4.021,94 cm²/g). Essa diferença não foi percebida na granulometria a laser, pois nesse último utilizou-se somente a fração fina de cada material. Portanto, conclui-se que o RBRO-M apresenta partículas mais finas que o RBRO-G na faixa granulometria entre 0,053 mm e 0,150 mm. Abaixo de 0,053 mm, ambos os resíduos possuem mesma finura.

5.1.4. Difração de raios X

As Figuras 32 e 33 apresentam a difração de raios X (DRX) do RBRO-G e do RBRO-M, respectivamente, realizado por meio de difratômetro D8 Advanced, da marca Bruker, por comparação com os padrões do banco de dados COD (*Crystallography Open Database*).

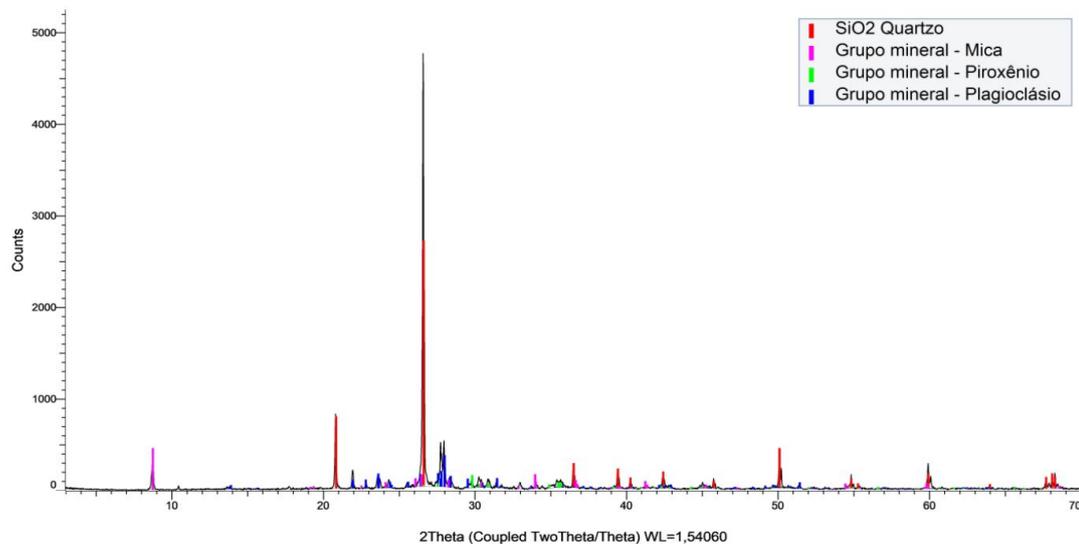
Pode-se observar a estrutura cristalina dos materiais, com picos nítidos além de uma linha de base horizontal. A grande presença de quartzo e mica na composição química dos materiais estudados, confere a estes, características típicas de rochas magmáticas e de rochas metamórficas (ULIANA et al., 2015). A presença do mineral piroxênio na Figura 33 também confere ao material características típicas de uma rocha metamórfica (BARBOSA, 1997).

Figura 32: Difratoograma do RBRO-G.



Fonte: Autor (2023).

Figura 33: Difratoograma do RBRO-M.



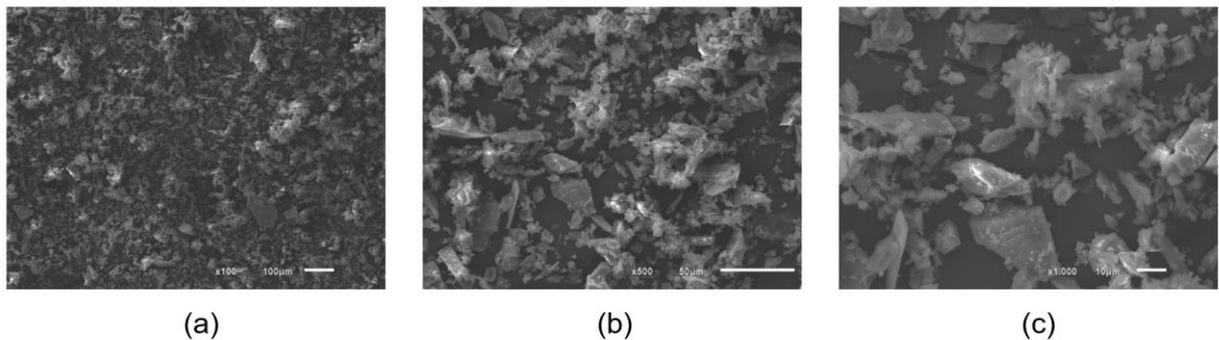
Fonte: Autor (2023).

Alguns pesquisadores que estudaram rochas ornamentais, incluindo rochas graníticas e de mármore, encontraram composições químicas similares às apontadas neste trabalho, para os mesmos tipos de rochas (VAZZOLER et al., 2018). Os autores apontaram inclusive que, a estrutura majoritariamente cristalina encontrada nesses tipos de resíduo confere aos mesmos características inertes.

5.1.5. Microscopia eletrônica de varredura

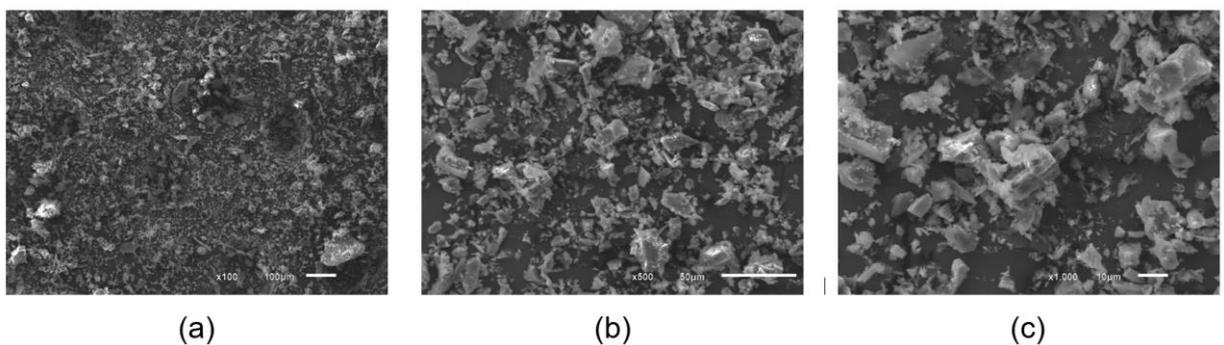
Foi realizado ensaio de microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) para os resíduos, com finalidade de observar a morfologia dos grãos, e ter um maior entendimento se estes influenciariam nos resultados obtidos. Observa-se nas Figuras 34 e 35, as imagens dos RBRO-G e do RBRO-M respectivamente, com diferentes aproximações. Observa-se que os grãos tem formas majoritariamente lamelares em ambos os casos.

Figura 34: Imagem de MEV do RBRO-G.



Fonte: Autor (2023).

Figura 35: Imagem de MEV do RBRO-M.



Fonte: Autor (2023).

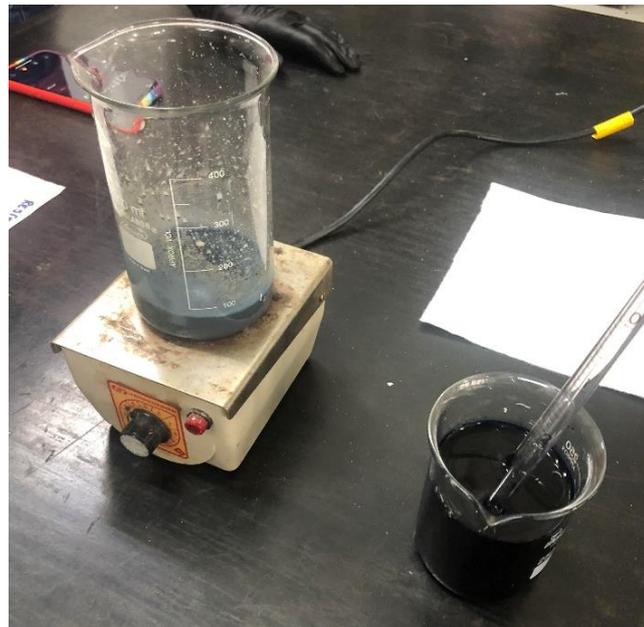
A morfologia das partículas pode influenciar nos resultados de porosidade e, conseqüentemente, resistência à compressão dos concretos (MASAD et al., 2005;

STEWART, 2006; SCHANKOSKI, 2017). Mas, diferentemente dos concretos convencionais, o aumento do índice de vazios da matriz em concretos drenantes não caracteriza, necessariamente, uma desvantagem do uso dessas partículas.

5.1.6. Adsorção de azul de metileno

Ensaio de adsorção de azul de metileno (Figura 36) também foi realizado para definir as características de superfície, devido à sua forte adsorção em suportes sólidos, conforme orientações da AASHTO TP57 (2000). Buscou-se, por meio deste ensaio, perceber os diferentes níveis de adsorção dos resíduos, uma vez que a mineralogia do material e a morfologia dos grãos, influenciam fortemente neste quesito.

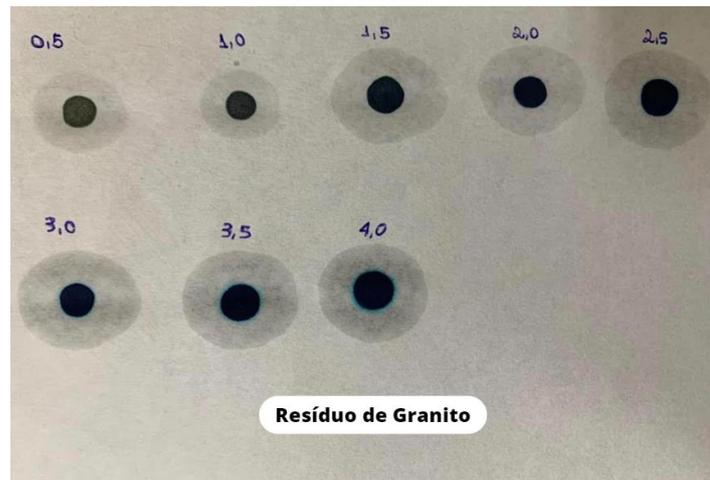
Figura 36: Ensaio de azul de metileno - solução com 5g/L.



Fonte: Autor (2023).

Os valores encontrados para os resíduos de granito e mármore foram 4,0 mg/g e 5,0 mg/g respectivamente (Figuras 37 e 38). Observa-se que, embora as morfologias apresentaram-se majoritariamente parecidas (lamelares) nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, houve uma diferença nos resultados, que podem ser explicados pela maior finura do mármore e/ou por características de superfície de origem mineralógica.

Figura 37: Azul de metileno no RBRO-G.



Fonte: Autor (2023).

Figura 38: Azul de metileno no RBRO-M.



Fonte: Autor (2023).

Wasilewska et al. (2017) obtiveram valores de 6,0 mg/g para adsorção de azul de metileno em filers de rochas graníticas. Já Stewart et al. (2006) mostraram resultados inferiores de adsorção em filers de mármore, com 2,17 mg/g.

5.2. Estado fresco

A única determinação realizada no estado fresco foi o ensaio de ponto de pelota, que consiste em um ensaio qualitativo para verificar a viabilidade da moldagem no concreto seco. Todas as misturas apresentaram-se aptas para moldagem, de acordo com esse teste.

No entanto, durante a fabricação dos pavers percebeu-se que a mistura contendo 15% de resíduo de mármore não apresentava coesão adequada com o tempo de vibro-prensagem estabelecido no teste piloto (10 s). Esses não estavam com estabilidade o suficiente para manter seu formato paralelepípedo e, ao manuseá-los, acabavam se desmanchando, sendo necessário manter a vibração por mais tempo para que os pavers pudessem ser confeccionados sem desagregação (14 s). Isso possivelmente ocorreu pela maior finura do resíduo de mármore que, ao adsorver água, diminuiu a coesão do concreto, uma vez que a quantidade de água se manteve constante em todos os traços.

5.3. Massa específica aparente

Na Tabela 7 é apresentada a massa específica média de seis pavers confeccionados com resíduo, e seu respectivo desvio padrão, em comparação com a mistura referência. Com exceção do paver com 15% de RBRO-M, que teve uma maior compactação, percebe-se que a incorporação de RBRO diminui a massa específica do paver, uma vez que o cimento (com massa específica de 3,17 kg/dm³) é substituído por resíduos com menor massa específica (2,73 e 2,75 kg/dm³, para granito e mármore, respectivamente). Além disso, houve aumento da porosidade da mistura com a incorporação de RBRO, que será abordada no próximo item.

Tabela 7: Massa específica aparente dos pavers incorporados com RBRO-G.

| Paver | Massa específica média (kg/m ³) | Desvio Padrão (kg/m ³) |
|------------|---------------------------------------------|------------------------------------|
| Referência | 2233,8 | 22,8 |
| 5% RBRO-G | 2215,0 | 23,6 |
| 10% RBRO-G | 2209,4 | 14,9 |
| 15% RBRO-G | 2156,3 | 18,8 |
| 5% RBRO-M | 2113,7 | 18,4 |
| 10% RBRO-M | 2173,8 | 10,3 |
| 15% RBRO-M | 2293,8 | 25,5 |

Fonte: Autor (2023).

Percebeu-se que o aumento do teor de RBRO-G nos concretos, provocou uma diminuição da massa específica do paver. Por outro lado, quando incorporou-se RBRO-M, embora as amostras tenham apresentado valores menores que a mistura

referência para os teores de 5 e 10%, não houve uma diminuição progressiva da massa específica com o aumento do teor de resíduo. Isso pode ter sido ocasionado pelo processo de fabricação. Já para a mistura 15% RBRO-M, o tempo de vibrocompressão foi significativamente maior. Com a compactação mais prolongada, houve uma redução no volume de poros, e consequente aumento da massa específica (OLIVEIRA, 2004).

Nas Figuras 39 e 40 tem-se os dois pavers permeáveis fabricados com 10 e 14 segundos de vibrocompressão, respectivamente. A redução da porosidade é evidente.

Figura 39: Paver fabricado com 10 segundos de vibrocompressão.



Fonte: Autor (2023).

Figura 40: Paver 15% RBRO-M fabricado com 14 segundos de vibrocompressão.



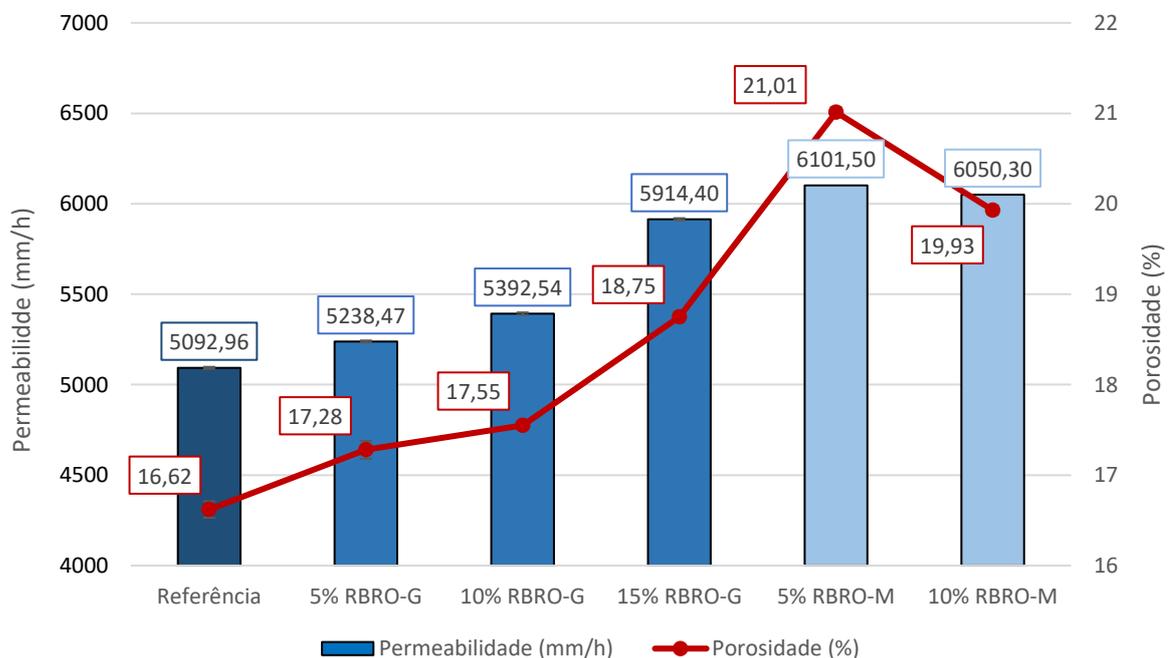
Fonte: Autor (2023).

5.4. Porosidade x Permeabilidade

A capacidade de drenagem (permeabilidade) de um concreto permeável é uma das propriedades mais importantes deste tipo de material, e está diretamente relacionado com o volume de vazios presente na matriz (porosidade).

A Figura 41 apresenta os resultados de permeabilidade e de porosidade dos pavers confeccionados com RBRO-G, além da mistura referência. O gráfico também apresenta o desvio padrão para ambas as propriedades (valores inferiores a 0,098% para porosidade e inferiores a 6,86 mm/h para permeabilidade). Em relação a porosidade, os resultados variaram entre 17,3 e 18,8% para as peças fabricadas com resíduo, sendo que a referência (sem resíduo) apresentou-se com 16,6%. Observa-se também os valores da permeabilidade, que variaram entre 5.238,50 a 5.914,40 mm/h para os pavers incorporados com RBRO-G, sendo 5.093,00 para a mistura referência.

Figura 41: Permeabilidade e porosidade dos pavers incorporados com RBRO-G e RBRO-M.



Fonte: Autor (2023).

Ainda na Figura 41, observa-se os resultados de permeabilidade e de porosidade dos pavers confeccionados com RBRO-M, além do desvio padrão (inferior a 0,091% para porosidade e inferior a 6,79 mm/h para permeabilidade). Percebe-se que a porosidade dos pavers variou entre 21,01 a 19,93% para as peças fabricadas com

resíduo de mármore, enquanto que a permeabilidade variou entre 6101,50 a 6050,30 mm/h.

Considerando os teores de 5 e 10%, percebe-se que os concretos contendo resíduo de mármore, apresentaram porosidade superior aos concretos contendo resíduo de granito, refletindo os resultados de massa específica, em que se obteve resultados entre 2113 e 2173 kg/m³ com RBRO-M, e entre 2215 e 2209 kg/m³ com RBRO-G.

No que se diz respeito à porcentagem de variação da permeabilidade das misturas incorporadas com resíduos em comparação à mistura referência, observou-se um aumento de 2,78, 5,55 e 13,89% para as misturas com 5, 10 e 15% de RBRO-G respectivamente, e de 16,53 e 15,82% para as misturas com 5 e 10% de RBRO-M respectivamente. Para a porosidade, observou-se um aumento de 3,82, 5,30 e 11,36% para as misturas com 5, 10 e 15% de RBRO-G respectivamente, e de 20,89 e 16,60% para as misturas com 5 e 10% de RBRO-M respectivamente. Não houve permeabilidade e porosidade para a mistura com 15% de mármore.

A porosidade e a permeabilidade nula do paver 15% RBRO-M invalida sua análise como concreto drenante. Isso ocorreu pela necessidade de maior tempo de vibrocompressão durante seu processo de fabricação. Essa necessidade pode ser justificada pela inadequação do proporcionamento do concreto para esse teor de substituição. Por se tratar de um resíduo mais fino colocado em maior quantidade, provavelmente o teor de água da mistura deveria ter sido aumentado, para permitir a confecção do paver com coesão. Então, como os pavers incorporados com 15% de RBRO-M não apresentaram característica suficientemente drenante, seus resultados não foram levados em consideração para as análises neste trabalho.

De maneira geral, todos os pavers apresentam porosidade próxima ao limite inferior das recomendações de diversos estudos sobre esse tipo de concreto, que apontavam valores entre 15 e 35% (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2021; BATEZINI et al., 2021; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Essa baixa porosidade pode ser justificada pela granulometria dos agregados graúdos utilizada. Embora estudos na área (ACI 522 2010; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016) tenham utilizado e sugerido agregados com classificação 9,5/25 mm e 19/31,5 mm (brita 1 e 2, respectivamente), para este trabalho os pavers foram desenvolvidos com agregados 4,75/12,5 mm (brita 0) e granilha. A redução da faixa granulométrica tipicamente utilizada na literatura se

deve ao fato que, os pavers, por serem artefatos de pequeno porte, são geralmente executados com agregados de menores dimensões.

O concreto referência apresentou o menor valor de porosidade porque continha o maior consumo de cimento que, ao se hidratar, produz compostos que preenchem a matriz da pasta de forma mais compacta.

Comparando os concretos incorporados com os resíduos de granito e mármore, para os teores de 5 e 10%, os pavers contendo mármore apresentaram maior porosidade. Isso pode ser justificado pela maior finura do resíduo (conforme Blaine e distribuição granulométrica). Quanto mais fino o resíduo, mais ele integra a matriz da pasta, e há menos comprometimento dos macro vazios, que garantem a drenagem de água (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2021).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) e a ACI 522 (2010) recomendam uma permeabilidade mínima de 3.600 mm/h (0,001 m/s) para pavimentos de peças de concreto permeáveis. A mistura referência apresentou uma permeabilidade muito superior à mínima exigida por norma, e como pode-se observar nos gráficos, o aumento do volume de vazios das misturas com RBRO-G acarretou, naturalmente, em um aumento da capacidade drenante. Para os pavers incorporados com RBRO-M, também se percebe a relação direta entre porosidade e permeabilidade.

As médias dos resultados de porosidade e permeabilidade, para as peças com RBRO-G e RBRO-M foram consideradas estatisticamente diferentes pela comparação de Tukey, com nível de significância de 5%, conforme pode ser observado na Tabela 08 e na Tabela 09, confirmando que o aumento do teor de RBRO resultou em aumento nesses dois índices.

Tabela 8: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para porosidade e permeabilidade das misturas com RBRO-G.

| Teor de RBRO-G | Porosidade (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE ¹ : 0,00897 | | | | Permeabilidade (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE ¹ : 56,702 | | | | Agrupamento. ² |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000325 | 0,000232 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | A |
| 5% | 0,000325 | | 0,033518 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | B |
| 10% | 0,000232 | 0,033518 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | C |
| 15% | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | D |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 9: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para porosidade e permeabilidade das misturas com RBRO-M.

| Teor de RBRO-M | Porosidade (valores p) $\alpha = 0,5 - \text{MSE}^1: 0,00538$ | | | | Permeabilidade (valores p) $\alpha = 0,5 - \text{MSE}^1: 43,125$ | | | | Agrupamento. ² |
|----------------|------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | A |
| 5% | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000260 | 0,000231 | B |
| 10% | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000260 | | 0,000231 | C |
| 15% | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | 0,000231 | 0,000231 | 0,000231 | | D |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Excluindo a mistura 15% RBRO-M da análise (em função da diferença no procedimento de vibroprensagem), percebeu-se que o material fino inerte (RBRO) não ocupa o macro espaço drenante dos pavers permeáveis, não comprometendo sua capacidade drenante. Alshareedah e Nassiri (2021) também observaram que, ao contrário dos agregados miúdos (areia) que reduzem significativamente os poros dos concretos permeáveis, materiais finos incorporados na mistura constituem a matriz da pasta, evitando impactos negativos na permeabilidade, mas podendo afetar a resistência mecânica.

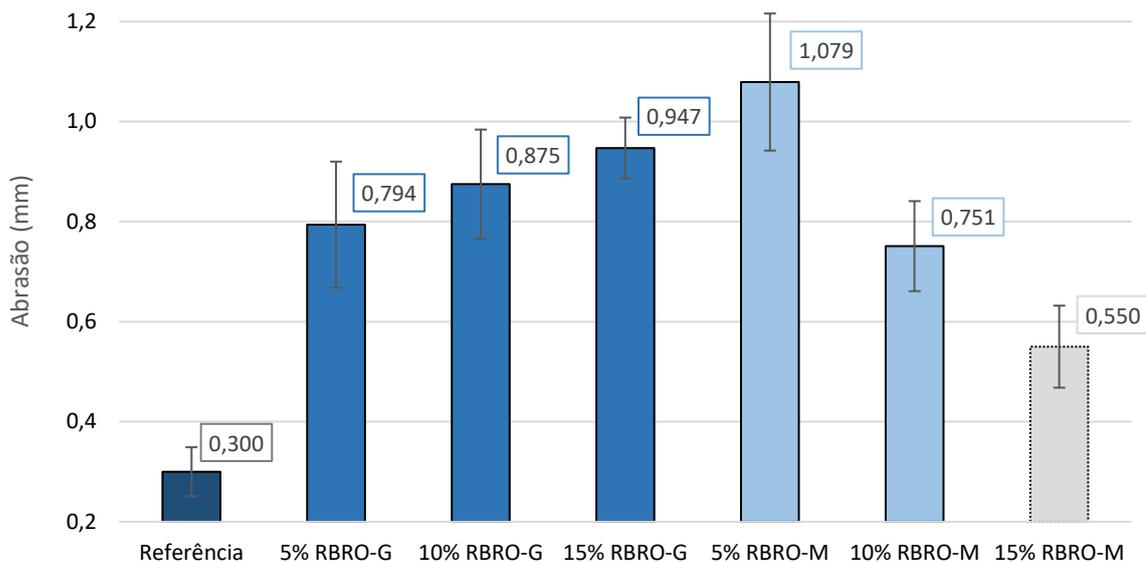
Vale salientar ainda que a capacidade de drenagem deste tipo de pavimento não está relacionada somente com a porosidade. Geralmente a permeabilidade de um concreto permeável é medida por meio de ensaios em corpo de prova individual, demonstrada pela ASTM C1701 (LEDERLE et al., 2020). Como este trabalho seguiu as orientações da NBR 16416 (ABNT, 2015), a permeabilidade foi mensurada em um sistema drenante construído. Então, entende-se que, parte da água infiltrou-se pelas juntas existentes entre os pavers do sistema. Este fator, sem dúvida, majorou a capacidade drenante, tornando-o extremamente eficiente no que se diz respeito à permeabilidade.

5.5. Resistência à Abrasão

Embora os testes de resistência à abrasão sejam de grande importância principalmente para blocos de pavimentação, as normas vigentes que orientam para este tipo de ensaio (NBR 9781, ABNT 2013; NBR 12042, ABNT 2013; NBR 16416, ABNT 2015) fazem desse uma escolha facultativa.

Na Figura 42 observa-se a resistência à abrasão encontrada para os RBRO-G que variou entre 0,794 a 0,947 mm, em comparação com a mistura referência, que obteve um resultado de 0,385 mm. Observa-se também a resistência à abrasão encontrada para os RBRO-M que variou entre 1,079 a 0,550 mm, em comparação com a mistura referência, que obteve um resultado de 0,300 mm.

Figura 42: Abrasão dos pavers incorporados com RBRO-G e RBRO-M.



Fonte: Autor (2023).

Com exceção da mistura 15% RBRO-M (que foi excluída das análises por não caracterizar um concreto drenante), percebe-se que a resistência à abrasão está atrelada a porosidade dos pavers. O maior desgaste ocorreu na mistura com maior porosidade (5% RBRO-M), assim como o menor desgaste ocorreu na mistura com a menor porosidade (Referência). Esses resultados estão de acordo com Hood (2006) e Altoé et al. (2017), que correlacionaram a redução da pasta de cimento com o maior desgaste do concreto.

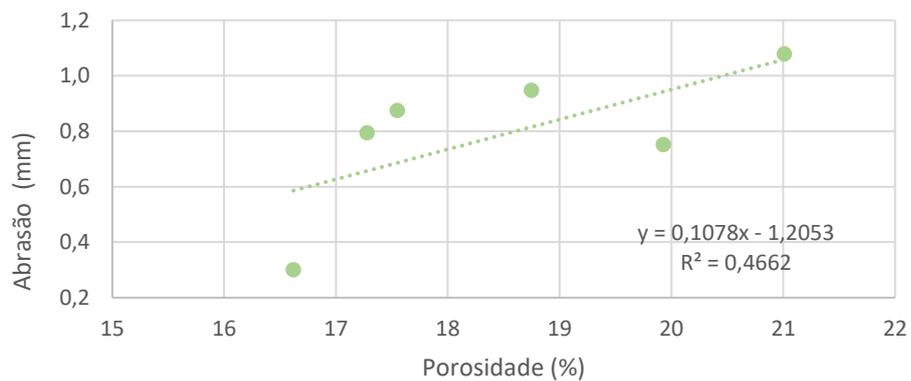
Alshareedah e Nassiri (2021) também mencionaram que, em uma mistura de concreto drenante, a pasta de cimento tem função somente de unir os agregados, majorando assim a permeabilidade por meio do grande volume de poros. Portanto, entende-se que, quanto menor o volume de pasta (mais poros), menor a “ancoragem” entre os grãos do agregado graúdo, permitindo que haja, com maior

facilidade, uma desagregação dos materiais constituintes do paver quando este é imposto ao teste de resistência à abrasão.

Importante observar que o desvio padrão de todas as misturas diminui conforme o volume de poros é reduzido. Isto se deve ao fato que, a superfície porosa do concreto permeável tornou as medições mais variáveis.

Realizando uma regressão linear entre porosidade e abrasão dos pavers testados (Figura 45), percebe-se que há uma tendência de aumento da abrasão com o aumento da porosidade. No entanto, o coeficiente de determinação (R^2) não é alto para o ajuste linear, sugerindo que a mineralogia do resíduo pode influenciar nos resultados.

Figura 43: Regressão linear entre os resultados de porosidade e desgaste.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 46 apresenta as imagens a), b) e c) demonstrando, respectivamente, os CPs com 5, 10 e 15% de incorporação de resíduo, que foram submetidos ao ensaio de resistência à abrasão.

Figura 44: Diferentes níveis de abrasão apresentados para diferentes volumes de porosidade dos pavers contendo resíduo de granito. .



Fonte: Autor (2023).

Vale ressaltar que as normas brasileiras não estabelecem limites de aceitação de resistência à abrasão para peças de concreto para pavimentação. Além disso, como mencionado, há métodos diferentes para a realização deste ensaio.

Realizando uma comparação múltipla de médias (comparação de Tukey), percebe-se que o resultado de abrasão da mistura referência é significativamente menor que as demais misturas, com 95% de confiabilidade. Em relação ao teor de resíduo adicionado, não houve diferença significativa no valor de desgaste em função da quantidade de RBRO-G adicionado, conforme pode ser visualizado na Tabela 10. Já para a incorporação de RBRO-M, pode-se perceber que a mistura contendo 15% apresentou o menor desgaste, seguido da 10% e 5%, com 95% de confiabilidade, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 10: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à abrasão para RBRO-G.

| Teor de RBRO-G | Resistência à abrasão (valores p) $\alpha = 0,5 - \text{MSE}^1: 0,01059$ | | | | Agrupamento ² |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000181 | 0,000181 | 0,000181 | A |
| 5% | 0,000181 | | 0,718574 | 0,081591 | B |
| 10% | 0,000181 | 0,718574 | | 0,453352 | B |
| 15% | 0,000181 | 0,081591 | 0,453352 | | B |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 11: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à abrasão para RBRO-M.

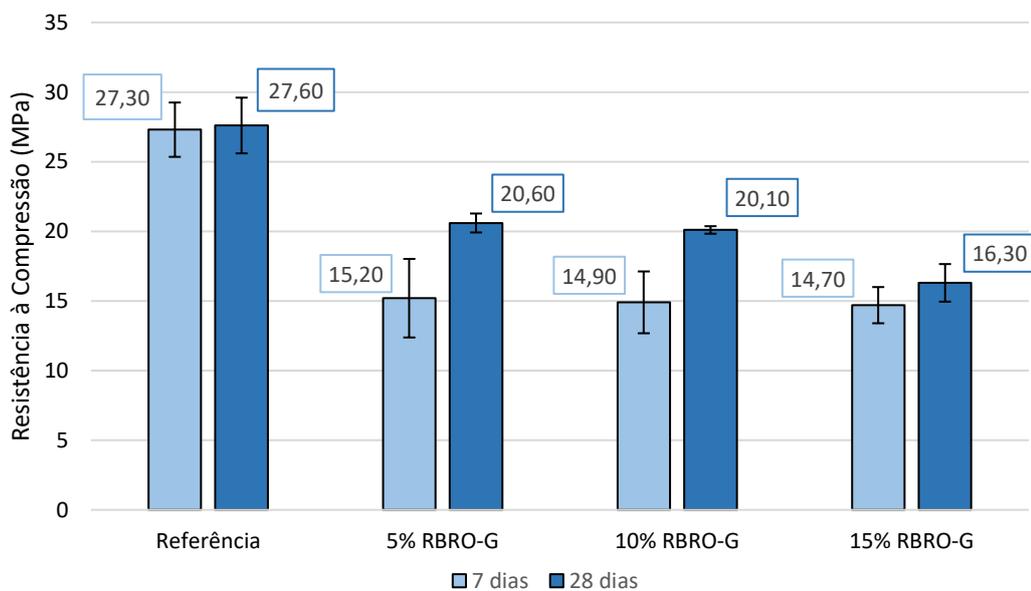
| Teor de RBRO-M | Resistência à abrasão (valores p) $\alpha = 0,5 - \text{MSE}^1: 0,01121$ | | | | Agrupamento ² |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000181 | 0,000184 | 0,005128 | A |
| 5% | 0,000181 | | 0,000352 | 0,000181 | D |
| 10% | 0,000184 | 0,000352 | | 0,018215 | C |
| 15% | 0,005128 | 0,000181 | 0,018215 | | B |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

5.6. Resistência à compressão

Na Figura 47 é apresentado os resultados de resistência à compressão dos pavers com 7 e 28 dias das misturas incorporadas com RBRO-G. Como era de se esperar, houve uma diminuição gradativa da resistência à compressão com a inserção do resíduo, já que a substituição ocorreu no aglomerante. Como o RBRO é predominantemente cristalino (conforme DRX da Figura 12), a relação água/aglomerante aumentou à medida que se aumentava o comteor de RBRO-G na mistura. Para o concreto referência a relação água/cimento foi de 0,207, sendo aumentada para 0,218, 0,230 e 0,244, para os concretos contendo 5, 10 e 15% de resíduo, respectivamente.

Figura 45: Resistência à compressão com 7 e 28 dias (RBRO-G).



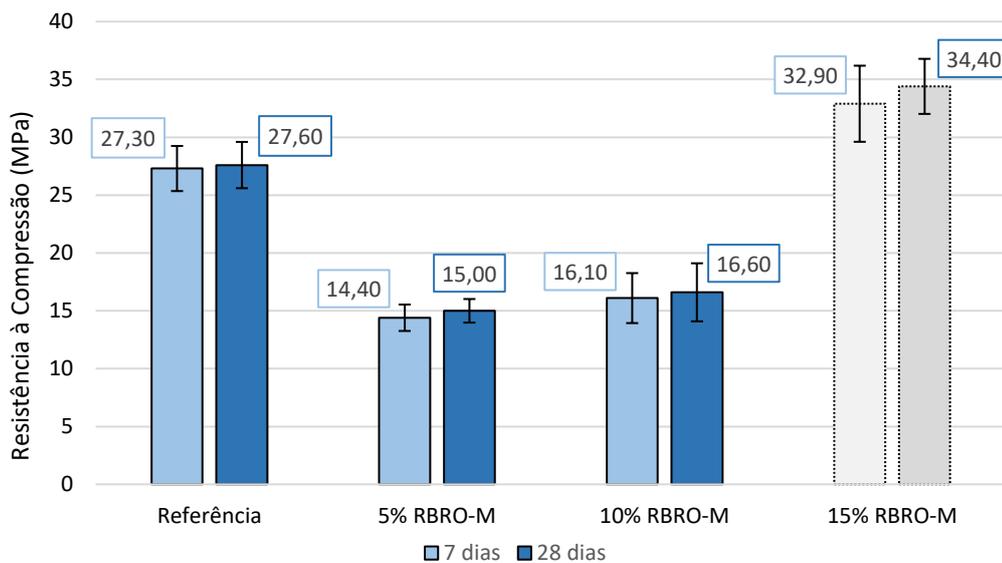
Fonte: Autor (2023).

Os resultados de resistência à compressão também refletem os valores de porosidade dos pavers, sendo inversamente proporcionais. Esses resultados corroboram com estudos de Sonebi e Bassuoni (2013), Ibrahim et al. (2020) e Alshareedah, Nassiri (2021). Assim, ao substituir o cimento por resíduos, o volume de pasta hidratada se tornou menor, isso ocasionou um aumento no índice de vazios e redução da resistência mecânica. Esta análise está em acordo com estudos de Sonebi e Bassuoni (2013), que também atribuíram a baixa porosidade ao menor volume de pasta hidratada.

Em relação a evolução de resistência à compressão nas idades de ensaio, percebe-se que houve pouca evolução na mistura referência, diferentemente das misturas contendo 5 e 10% de RBRO-G. Como a substituição ocorreu no cimento, a resistência nas primeiras idades sofreu maior impacto, visto que se tratava de um cimento CPV.

A ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015) prescreve a resistência mecânica característica mínima de 20 MPa aos 28 dias para peças de concreto permeável de tráfego de pedestres e tráfego leve. Portanto, concretos drenantes com até 10% de substituição de cimento por RBRO-G, satisfazem esse requisito de norma, possuindo a vantagem de diluir o cimento da pasta aglutinante necessária para envolver e aderir os agregados. Na Figura 48 é apresentado os resultados de resistência à compressão dos pavers com 7 e 28 dias das misturas incorporadas com RBRO-M.

Figura 46: Resistência à compressão com 7 e 28 dias (RBRO-M).



Fonte: Autor (2023).

Percebe-se que os pavers incorporados com 5 e 10% de RBRO-M tiveram resistências menores quando comparados aos pavers incorporados com 5 e 10% de RBRO-G. Estes resultados se devem à porosidade, uma vez que seus valores para os pavers incorporados com mármore foram maiores. Logo, quanto maior o volume de poros do paver drenante, menor sua resistência à compressão. Lembrando que os resultados da mistura com 15% de incorporação de mármore, não foram levados em consideração.

A fim de ratificar as conclusões sobre a resistência à compressão dos pavers incorporados com RBRO-G com 28 dias, na Tabela 12 tem-se a comparação de Tukey, com nível de significância de 5%. Percebe-se que os valores p das amostras com 5 e 10% de resíduo são superiores a 0,5, o que indica homogeneidade de variância. A resistência à compressão dos demais pavers (com 0 e 15% de RBRO) são significativamente diferentes, com 95% de confiabilidade. Dessa forma, percebe-se que não há diferença significativa entre a resistência dos concretos contendo 5 e 10% de RBRO-G.

Tabela 12: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias para RBRO-G.

| Teor de RBRO-G | Resistência à compressão (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE ¹ : 1,7964 | | | | Agrupamento ² |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000175 | 0,000175 | 0,000175 | A |
| 5% | 0,000175 | | 0,656205 | 0,000775 | B |
| 10% | 0,000175 | 0,656205 | | 0,009077 | B |
| 15% | 0,000175 | 0,000775 | 0,009077 | | C |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

A mesma análise pode ser feita para os pavers incorporados com resíduo de mármore. Na Tabela 13 observa-se que não há diferença significativa entre as resistências dos pavers com 5 e 10% de RBRO-M, e que esses são significativamente menos resistentes do que a mistura referência, com 95% de confiabilidade.

Tabela 13: Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias para RBRO-M.

| Teor de RBRO-M | Resistência à compressão (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE ¹ : 5,1026 | | | | Agrupamento ² |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | {1} | {2} | {3} | {4} | |
| 0 | | 0,000175 | 0,000175 | 0,000293 | B |
| 5% | 0,000175 | | 0,119836 | 0,000175 | C |
| 10% | 0,000175 | 0,119836 | | 0,000175 | C |
| 15% | 0,000293 | 0,000175 | 0,000175 | | A |

1: erro quadrático médio; 2: teores que não compartilham uma letra são

significativamente diferentes.

Foi realizada também uma análise estatística com todos os resultados de resistência à compressão (incluindo as duas mineralogias na mesma análise) conforme observa-se na Tabela 14.

Tabela 14: Comparação entre médias com os dois resíduos.

| Teor | MINERALOGIA | Resistência à compressão (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE ¹ : 2,9918 | | | | | | AGRUPAMENTO | | | | |
|------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| | | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} | | | | | |
| 5% | GRANITO | | 0,000287 | 0,943208 | 0,288950 | 0,010576 | 0,000134 | | B | | | |
| 5% | MÁRMORE | 0,000287 | | 0,002076 | 0,046868 | 0,645114 | 0,000134 | | | | | D |
| 10% | GRANITO | 0,943208 | 0,002076 | | 0,807951 | 0,087531 | 0,000134 | | B | C | | |
| 10% | MÁRMORE | 0,288950 | 0,046868 | 0,807951 | | 0,645114 | 0,000134 | | B | C | | |
| 15% | GRANITO | 0,010576 | 0,645114 | 0,087531 | 0,645114 | | 0,000134 | | | C | D | |
| 15% | MÁRMORE | 0,000134 | 0,000134 | 0,000134 | 0,000134 | 0,000134 | | A | | | | |

Fonte: Autor (2023).

Percebe-se que 15% RBRO-M é significativamente mais resistente que os demais, mas esse concreto não apresentou características drenantes. As misturas 5% RBRO-G, 10% RBRO-G e 10% RBRO-M não apresentam diferença significativa na resistência à compressão com 28 dias, com 95% de confiabilidade, sendo significativamente maiores que 5% RBRO-M e 15% RBRO-G.

5.7. Consumo de cimento

Como a porosidade é um fator determinante em concretos permeáveis, os valores de resistência foram corrigidos levando em consideração a porosidade dos elementos. A correção foi baseada no trabalho de Nassiri e Alshareedah (2017), em relação a porosidade da mistura referência (Tabela 15).

Tabela 15: Modelo estatístico utilizado para correlacionar e corrigir os concretos com diferentes porosidades.

| Modelo estatístico | Faixa de valores |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $f_c - 28 \text{ dias} = 25,38 - 0,539.P - 13,12.(A/C) + 0,0045.C$ (R2 = 0,92) | f_c -28 dias: 0,9 a 23,7; P: 13 a 24%; A/C: 0,14 a 0,4; C: 150 a 412 |
| $f_c - 28 \text{ dias}$: resistência à compressão (MPa); P: porosidade (%); A/C: relação água-cimento; C: índice de cimento (kg/m ³) | |

Fonte: Nassiri e Alshareeddah (2017)

Como as composições dosadas apresentaram diferentes consumos de cimento por m³, na Tabela 16 observa-se o índice de cimento para cada um.

Tabela 16: Índice de cimento dos concretos drenantes confeccionados com RBRO-G.

| Paver | Correção Resistência | Resistência corrigida (MPa) | Consumo de cimento (kg/m ³) | Índice Cimento kg/m ³ (MPa) |
|------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Referência | 0 | 27,60 | 340,2 | 12,3 |
| 5% RBRO-G | +3% | 21,18 | 320,9 | 15,1 |
| 10% RBRO-G | +4% | 20,91 | 303,7 | 14,5 |
| 15% RBRO-G | +10% | 17,89 | 280,4 | 15,7 |
| 5% RBRO-M | +22% | 18,36 | 306,2 | 16,7 |
| 10% RBRO-M | +16% | 19,26 | 298,8 | 15,5 |
| 15% RBRO-M | -41% | 20,33 | 298,2 | 14,7 |

Fonte: Autor (2023).

Percebe-se que a mistura referência apresentou o menor índice, seguido da mistura 10% RBRO-G. A mistura 15% RBRO-M apresentou índice semelhante a mistura 10% RBRO-G, mas como não corresponde a um concreto drenante, a análise é rejeitada.

5.8. Análise de variância (ANOVA)

Análise de variância (ANOVA) foi utilizada para determinar a influência do teor de resíduo incorporado e da mineralogia nos resultados de resistência à compressão, permeabilidade, porosidade e abrasão das misturas de concreto permeável. Observa-se na Tabela 17 que o teor de resíduo adicionado apresentou influência em todos os parâmetros testados, com 95% de confiabilidade. A mineralogia também foi um fator de grande influência na resistência à compressão, apresentando influência menor nas demais propriedades (abaixo de 95%).

Tabela 17: ANOVA - influência do teor e da mineralogia do RBRO na porosidade, permeabilidade, abrasão e resistência à compressão dos pavers.

| Parâmetro | Fonte | SQ | GL | MQ | F | Probabilidade |
|--------------------------|-------------|----------|----|----------|----------|---------------|
| Porosidade | Teor | 366,7081 | 2 | 183,3541 | 6,150313 | 98,96% |
| | Mineralogia | 79,8427 | 1 | 79,8427 | 2,678192 | 87,88% |
| | Erro | 476,9944 | 16 | 29,8122 | | |
| Permeabilidade | Teor | 30005466 | 2 | 15002733 | 5,383925 | 98,37% |
| | Mineralogia | 9651904 | 1 | 9651904 | 3,463711 | 91,88% |
| | Erro | 44585265 | 16 | 2786579 | | |
| Abrasão | Teor | 0,225275 | 2 | 0,112638 | 3,670865 | 96,46% |
| | Mineralogia | 0,047451 | 1 | 0,047451 | 1,546443 | 77,83% |
| | Erro | 1,104631 | 36 | 0,030684 | | |
| Resistência à Compressão | Teor | 514,784 | 2 | 257,3919 | 8,346713 | 99,90% |
| | Mineralogia | 161,290 | 1 | 161,2900 | 5,230316 | 97,20% |
| | Erro | 1140,988 | 37 | 30,8375 | | |

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadradas; F: distribuição de Fisher.

6. CONCLUSÕES

Com o estudo realizado, pode-se obter as seguintes conclusões:

- O proporcionamento do paver referência apresentou resultados de acordo com as prescrições estabelecidas na NBR 16416 (ABNT, 2015). Alcançou-se um pavimento com grande capacidade drenante (5.092,96 mm/h), composto por peças com uma porcentagem de poros suficientemente aberta (16,62%), além de resistência à compressão aos 28 dias de 27,60 MPa.
- Para a fabricação de peças de concreto permeáveis com os traços testados e sugeridos neste trabalho, os teores de 5 e 10% de substituição de cimento por granito atendem aos principais parâmetros que caracterizam um concreto drenante: porosidade, permeabilidade e resistência à compressão mínima, sendo que, todos os traços com incorporação deste tipo de resíduo tiveram aspecto drenante melhores que o traço referência.
- Como a resistência à compressão dos pavers incorporados com RBRO-G não teve diferença significativa com 95% de confiabilidade, o teor de 10% de RBRO-G é o mais otimizado do ponto de vista técnico-econômico, embora ainda tenha apresentado resultados inferiores ao paver referência.
- O traço com 15% de incorporação de RBRO-G em substituição ao cimento, não atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão orientados pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que exige um valor mínimo de 20,00 MPa. Embora os valores de porosidade e permeabilidade tenham sido satisfatórios, a resistência à compressão apontada foi de 16,30 MPa aos 28 dias.
- Os pavers incorporados com resíduos de mármore não atenderam aos requisitos mínimos exigidos pela norma vigente (NBR 16416, ABNT 2015). Ainda que a mistura incorporada com 15% de RBRO-M tenha alcançado elevada resistência (34,40 MPa), esta não obteve resultados satisfatórios no que se diz respeito à porosidade e permeabilidade.
- As misturas com 5 e 10% de incorporação de RBRO-M obtiveram elevada porosidade e permeabilidade, estando dentro das exigências mínimas normativas. Contudo, a alta porosidade fez com que a resistência à compressão destas misturas ficasse comprometida, estando a baixo de 20,00 MPa.

- Para a resistência à abrasão, como o método empregado para mensurar o desgaste das peças foi diferente do que é orientado pela norma, não se pode concluir se, de fato, as misturas estão dentro dos padrões referenciados pela literatura. A mistura referência apresentou o menor desgaste. Não houve diferença significativa entre o desgaste das misturas contendo diferentes teores de RBRO-G. O maior desgaste ocorreu com o paver 5% RBRO-M. Identificou-se uma tendência de aumento do desgaste com o aumento da porosidade da mistura.
- Vale salientar que atualmente há um custo para que as empresas comercializadoras de rochas ornamentais (marmorarias) descartem este tipo de resíduo, que geralmente são destinados à aterros. Portanto, utilizá-los como coproduto na fabricação de materiais de construção, pode agregar valor ao mesmo, viabilizando economicamente a sua utilização, uma vez que, além de não pagar pelo seu descarte, as indústrias geradoras poderão vendê-los.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Embora tenha-se observado em estudos que, algumas normas estrangeiras orientam uma porosidade mínima de 15% para concretos permeáveis, não há de fato uma exigência da NBR 16416 (ABNT, 2015), que trata de pavimentos permeáveis, quanto a porosidade mínima de um concreto permeável. Portanto, sugere-se a realização de novos estudos, a fim de elaborar um novo traço (baseado neste aqui dissertado) que produza pavers com menor volume de porosidade, incorporando por exemplo, quantidades reduzidas de agregado miúdo, ou aumentando o teor de cimento, com o intuito de majorar sua resistência à compressão e reduzir sua capacidade drenante, uma vez que os valores de permeabilidade foram muito maiores que o mínimo apontado pela norma.
- Testar resíduos do beneficiamento de rocha ornamental de outras origens mineralógicas, verificando se os resultados serão diferentes, na incorporação em concreto drenante, mais especificamente na fabricação de pavers.
- Avaliar a morfologia das partículas de resíduo por meio de coeficiente de forma, angularidade, rugosidade e relação de aspecto, para verificar se influenciam na porosidade e permeabilidade das misturas.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12042:** Materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ACI committee 522. **Report on Pervious Concrete.** American Concrete Institute Farmington Hills, MI, Farmington Hills, Michigan, USA (2010).
- ASTM C1754 / C1754M,** Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ALSHAREEDAH, Othman; NASSIRI, Somayeh; DOLAN, J. Daniel. Pervious concrete under flexural fatigue loading: Performance evaluation and model development. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 17-27, 2019.
- ALSHAREEDAH, Othman; NASSIRI, Somayeh. Pervious Concrete Mixture Optimization, Physical, and Mechanical Properties and Pavement Design: A Review. **Journal of Cleaner Production**, p. 125095, 2020.
- ALTOÉ, Silvia Paula Sossai et al. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇUCAR E DE PNEU. 2017.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO TP57-99.** Standard Test Method for Methylene Blue Value of Clays Mineral Fillers, and Fines. AASHTO Standards., Washington, D.C., 2000.
- AREL, Hasan Şahan. Recyclability of waste marble in concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 179-188, 2016.
- ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Adição de resíduo da indústria de granito em escória de aciaria BOF visando sua utilização na produção de cimento.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.
- BARBOSA, Johildo Salomão Figueirêdo. Síntese do conhecimento sobre a evolução geotectônica das rochas metamórficas arqueanas e paleoproterozóicas do embasamento do Cráton do São Francisco na Bahia. **Brazilian Journal of Geology**, v. 27, n. 3, p. 241-256, 1997.
- BARROS, Maicon Martins et al. Ecological bricks from dimension stone waste and

polyester resin. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117252, 2020.

BATEZINI, Rafael et al. Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 177-194, 2021.

BELLEW, G. P.E. Petrographic and Technological Methods for Evaluation of Concrete Aggregates, **Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**, Ramachandran, V.E., Beaudoin, J.J., ed., Chapter 2, William Andrew Publishing/Noyes Publications, New York, 2001.

B. HUANG, H. WU, X. SHU, E.G. BURDETTE. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete**. *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010), pp. 818-823.

BRESSON, Jacques. **La Vibration des bétons**. CERIB, 2001.

CABELLO, Sandra et al. **Concreto poroso: constitución, variables influyentes y protocolos para su caracterización**. 2015.

CALMON, J. L.; BACARJI, E.; FIGUEIREDO, E. J. P.; RÊGO, J. H. S.; PEREIRA, A. C. Estudo da viabilidade técnica da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como filler nas propriedades do concreto. Congresso Brasileiro do Concreto, 49. 2007, Bento Gonçalves. **Anais**. Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

CARMICHAEL, M. JEMIMAH; ARULRAJ, G. PRINCE; MEYYAPPAN, P. L. **Effect of partial replacement of cement with nano fly ash on permeable concrete: A strength study**. *Materials Today: Proceedings*, 2021.

CHANDRAPPA, ANUSH K.; BILIGIRI, KRISHNA PRAPOORNA. Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and building materials**, v. 111, p. 262-274, 2016.

CHEN, XIAODAN et al. Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. **Journal of cleaner production**, v. 237, p. 117714, 2019.

CHEN, YU et al. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 97-104, 2013.

COSTA, João Bosco Burgos et al. Correlação entre características de rochas e rendimentos de corte com fio diamantado na lavra de rochas ornamentais. 2009.

COURARD, Luc et al. Effects of limestone fillers on surface free energy and electrical conductivity of the interstitial solution of cement mixes. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 111-116, 2014.

CROUCH, L. K. et al. Determining pervious PCC permeability with a simple triaxial flexible-wall constant head permeameter. In: **TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM**. 2006.

CYR, Martin; LAWRENCE, Philippe; RINGOT, Erick. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in

relation with compressive strength. **Cement and concrete research**, v. 36, n. 2, p. 264-277, 2006.

DAI, Zhen et al. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117178, 2020.

DAMINELI, Bruno Luís. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DE MATOS, Paulo Ricardo et al. Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. **Journal of environmental management**, v. 244, p. 294-303, 2019.

DE MOURA, João Marcos Bosi Mendonça et al. Sustainable pervious concrete containing glass powder waste: Performance and modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, p. 128213, 2021.

FARES, Galal; ALBAROUD, Mahmoud Hamad; KHAN, M. Iqbal. Fine limestone dust from ornamental stone factories: A potential filler for a high-performance cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 428-438, 2019.

FELEKOGLU, B. A new approach to the characterization of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry, **Construction and Building Materials**, Volume 23, Issue 2, Pg 1154-1162, 2009.

FELEKOGLU, B. Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete, **Cement and Concrete Composites**, Volume 29, Issue 6, 2007, Pg 481-489.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions applied to ceramic manufacturing**. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 1994. 765p.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, n. 102, 2016.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GUTTERIDGE, Walter A.; DALZIEL, John A. **Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: part I. A fine non-hydraulic filler**. *Cement and Concrete Research*, v. 20, n. 5, p. 778-782, 1990.

HAWKING, P.; TENNIS, P.; DETWILER, R. **The Use of Limestone in Portland Cement: a state-of-the-art review**. Portland Cement Association. 2003.

HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; NG, C.C; TAM, C.T. The use of quarry dust for SCC applications, **Cement and Concrete Research**, Volume 32, Issue 4, April 2002, Pg 505-511.

HONG, Yao-Ming. The simplified design method of permeable pavement system for urban catchment. **Environmental Challenges**, v. 2, p. 100014, 2021.

HOOD, Scott; DA SILVA, Rogério. Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação. 2006.

HUNGER, Martin; BROUWERS, H. J. H. Flow analysis of water–powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 39-59, 2009.

IBRAHIM, Ahmed et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and building materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.

IBRAHIM, Hussein Adebayo et al. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119251, 2020.

IRASSAR, EF BOANAVETTI; MENÉNDES, G.; HIDRATAÇÃO, M. F. C. propriedades de cimentos compostos (com três adições) com fíler calcário e escória. **Revista ALCONPAT, Yucatan**, v. 5, n. 2, p. 83-95, 2015.

Isaia GC, editor. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. Ibracon; 2007.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

KADRI, E.H.; AGGOUN, S.; DE SHUTTER, G.; EZZIANE, K. Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. **Materials and Structures**. Vol. 43. 2010.

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

KEVERN, John T.; WANG, Kejin; SCHAEFER, Vernon R. Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 469-475, 2010.

KEVERN, J. T. et al. Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. **Journal of ASTM International**, v. 5, n. 2, p. 1-12, 2008.

KHYALIYA, Rajendra Kumar; KABEER, KI Syed Ahmed; VYAS, Ashok Kumar. Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 598-607, 2017.

KRONLOF, A. "Effect of very fine aggregate on concrete strength," *Materials and Structures*, Vol 27, 1994, pp. 15-25.

KUO, C.-Y., "Correlating Permanent Deformation Characteristics of Hot Mix Asphalt with Aggregate Geometric Irregularities," **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, Vol. 30, N. 2, March 2002, pp. 136–144.

LAMB, Gisele Santoro. Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável. 2014.

LANG, Lei; DUAN, Haijuan; CHEN, Bing. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 95-104, 2019.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration, **Cement and Concrete Research**, Volume 33, Issue 12, December 2003, Pages 1939-1947.

LEDERLE, Rita; SHEPARD, Thomas; MEZA, Vanessa De La Vega. Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118339, 2020.

LI, AoYang et al. Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 123997, 2021.

LI, Diyuan et al. Application of polymer, silica-fume and crushed rubber in the production of Pervious concrete. **Smart Struct. Syst**, v. 23, n. 2, p. 207-214, 2019.

LIU, Tiejun et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 72-82, 2019.

LOTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials**. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

LU, Jian-Xin et al. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1102-1112, 2019.

MAGUESVARI, M. Uma; NARASIMHA, V. L. Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 198-207, 2013.

MARCHON, D.; MANTELLATO, S.; EBERHARDT, A.B.; FLATT, R.J. Adsorption of chemical admixtures. In **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing 59. Ed. Aitcin and Flatt. UK, 2016.

MASAD, E., SAADEH, S., AL-ROUSAN, T., GARBOCZI, E., LITTLE, D. Computations of Particle Surface Characteristics using Optical and X-Ray CT Images, **Journal of Computational Materials Science**, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Edição. São Paulo. IBRACON, 2014.

MENDES, SILVA, JUNIOR, STRADIOTTI. **Impactos ambientais no setor de rochas ornamentais no Espírito Santo e alocação e reaproveitamento de seus resíduos**. Artigo (Graduação em Administração de Empresas) - Curso de Administração de Empresas, Faculdade Multivix Cachoeiro de Itapemirim, 2016.

MONTANI, C. **Dossiê Brasil 2019**. Relatório mármore e rochas no mundo 2019 – Doissiê Brasil 2019. ABI Rochas.

MONTEIRO, Carlos Filipe Fernandes et al. **Corte de pedra por fio diamantado**. 2014. Tese de Doutorado.

NEITHALATH, Narayanan; SUMANASOORIYA, Milani S.; DEO, Omkar. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials characterization**, v. 61, n. 8, p. 802-813, 2010.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2ª Edição. Pini, 1997.

OLIVEIRA, A.L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, IR de et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo arte editorial**, v. 224, p. 119-137, 2000.

PECEÑO, Begoña et al. Substitution of coarse aggregates with mollusk-shell waste in acoustic-absorbing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 04019077, 2019.

PILEGGI, R. G. et al. High performance refractory castables: particle size design. **Refract. Appl. News**, v. 8, n. 5, p. 17-21, 2003.

PIROLA, Fernanda Carvalho et al. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50MPa**. 2012.

PONTES, Ivan Falcão; JÚNIOR, A. Stellin. Utilização de resíduos de rochas ornamentais nas indústrias de construção civil. **ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA**, v. 21, 2005.

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

RANGELOV, Milena et al. **Preliminary study to develop standard acceptance tests for pervious concrete**. Washington (State). Dept. of Transportation. Office of Research and Library Services, 2017.

RODRIGUES, Púlio Penna Firme. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação – Prática recomendada**. 2ª ed. São Paulo, ABCP, 1995, 20 p.

SABOO, Nikhil et al. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 322-328, 2019.

SUMANASOORIYA, Milani S.; DEO, Omkar; NEITHALATH, Narayanan. Particle Packing-Based Material Design Methodology for Pervious Concretes. **ACI materials Journal**, v. 109, n. 2, 2012.

SANDOVAL, Gersson FB et al. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. **Case studies in construction materials**, v. 7, p. 317-328, 2017.

SANTOS, Max M. Aguiar; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, p. 1442-1450, 2013.

SATA, Vanchai; WONGSA, Ampol; CHINDAPRASIRT, Prinya. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 33-39, 2013.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida et al. Evaluation of fresh cement pastes containing quarry by-product powders. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 234-242, 2017.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida et al. **Estudo de concreto autoadensável contendo fíler de britagem: características das partículas, floculação e reologia**. 2017.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida et al. Fresh and hardened properties of self-compacting concretes produced with diabase and gneiss quarry by-product powders as alternative fillers. **Construction and Building Materials**, 2019.

SILVA. **Práticas ambientais para destino correto de resíduos das indústrias de beneficiamento de granito do estado da Paraíba**. TCC (Graduação em Química) – Curso de Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba, 2018.

SILVA, SAC da. Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassas de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento. **Espírito Santo**, 1998.

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

STANDARD, A. S. T. M. C1701/C1701M-09 Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. **ASTM International, West Conshohocken, PA**, 2009.

STANDARD, A. S. T. M. D2434-68 (2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D2434-68R06.

STEWART J.; NORVELL, J.; JUENGER, M.; FOWLER, D.W. ICAR Report 107-1 **ICAR 107: Characterizing minus N° 200 fine aggregate for performance in concrete**. International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin. Austin, 2003.

STEWART, Jane et al. **Characterizing minus No. 200 fine aggregate for performance in concrete**. 2006.

SU, Nan; MIAO, Buquan. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 215-222, 2003.

SURESHCHANDRA, H. S.; SARANGAPANI, G.; KUMAR, BG Naresh. **Experimental**

investigation on the effect of replacement of sand by quarry dust in hollow concrete block for different mix proportions. International Journal of Environmental Science and Development, v. 5, n. 1, p. 15, 2014.

TOGHROLI, Ali et al. Investigation on composite polymer and silica fume–rubber aggregate pervious concrete. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering-CSM.** 2017.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DALMOLIN, Denise Carpena. Concreto auto-adensável. **São Paulo: PINI,** 2008.

ULIANA, Juliana Gavini et al. Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais,** v. 8, p. 100-123, 2015.

UNITED NATIONS (UN), 2019. **Sustainable development goals knowledge platform.** <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>.

VAZZOLER, J.S.; VIEIRA, G.L.; TELES, C.R.; DEGEN, M.K.; TEIXEIRA, R.A. Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. **Construction and Building Materials,** n. 177, 2018.

VILLASCHI, A. F.; SABADINI, M. Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (mármore e granito). **ES Relatório de pesquisa BNDES Rio de Janeiro,** 2000.

V. M. John. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** G Isaia, editor. IBRACON 2017.

XU, Yidong et al. Studying the mix design and investigating the photocatalytic performance of pervious concrete containing TiO₂-Soaked recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production,** v. 248, p. 119281, 2020.

ZAETANG, Yuwadee et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials,** v. 111, p. 15-21, 2016.

ZHANG, Yi et al. Effect of different factors on sound absorption property of porous concrete. **Transportation Research Part D: Transport and Environment,** v. 87, p. 102532, 2020.

KHANKHAJE, Elnaz et al. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review. **Developments in the Built Environment,** p. 100130, 2023.

WANG, Hanbing et al. Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. **Construction and Building Materials,** v. 202, p. 387-395, 2019.

WANG, K. et al. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete. In: **NRMCA concrete technology forum: focus on pervious concrete.** Nashville, 2006. p. 1-12.

WASILEWSKA, Marta; MAŁASZKIEWICZ, Dorota; IGNATIUK, Natalia. Evaluation of different mineral filler aggregates for asphalt mixtures. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 022042.

XIE, Ning; AKIN, Michelle; SHI, Xianming. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of cleaner production**, v. 210, p. 1605-1621, 2019.

YAHIA, Ammar; KABAGIRE, K. Daddy. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 38-46, 2014.

YANG, Jing; JIANG, Guoliang. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

YUKSELEN, Y.; KAYA, A. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. **Engineering Geology** 102, pg 38-45. 2008.