

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gilber da Silva Júnior

O efeito filler em blocos de pavimentação com uso do pó de mármore

Juiz de Fora

2021

Gilber da Silva Júnior

O efeito filler em blocos de pavimentação com uso do pó de mármore

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr^a. Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva Júnior, Gilber da.

O efeito filler em blocos de pavimentação com uso do pó de mármore / Gilber da Silva Júnior. -- 2021.

109 f. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Leonardo Gonçalves Pedroti

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Pó de Mármore. 2. Filler. 3. Bloco de Pavimentação. 4. Concreto. 5. Empacotamento. I. Oliveira, Thaís Mayra de, orient. II. Pedroti, Leonardo Gonçalves, coorient. III. Título.

Gilber da Silva Júnior

O efeito filler em blocos de pavimentação com uso do pó de mármore

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovado em 22 de outubro de 2021.

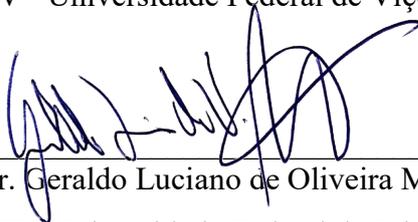
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr^a. Thaís Mayra de Oliveira - Orientadora
PEC UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti - Coorientador
UFV - Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques
PEC UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr^a. Júlia Castro Mendes

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

À minha família, em especial meus pais Simone e Gilber, que me deram, além de muito amor e carinho, apoio incondicional, suporte e ambiente propício para que eu pudesse estudar e alcançar os meus objetivos. À minha querida irmã e amiga, Giovana, por todo companheirismo e admiração.

Agradeço ao maior presente que ganhei nesse período, minha namorada Raquel, por toda ajuda e por sempre acreditar em mim. Parte desta conquista também é sua!

Aos meus amigos, Arthur Casali e Sebastião, cuja colaboração e auxílio irrestrito foram primordiais para o resultado final deste trabalho, que é nosso!

Aos novos e antigos amigos, que se fizeram presentes em minha vida, sempre me ajudando nos momentos mais difíceis e torcendo pelo meu sucesso.

À laboratorista Romilda, aos graduandos, Vitor e Fernando, e a todos os funcionários que participaram direta e indiretamente da elaboração do estudo.

Por fim, mas não menos importante, à UFJF por todo apoio e incentivo oferecido ao longo desses anos.

RESUMO

A construção civil é um dos setores que representa maior potencial na geração de riquezas e empregos no mundo, contudo em decorrência da sua relevância econômica é um dos segmentos mais impactantes ao meio ambiente. Essa problemática se dá pela extração de recursos naturais e pela grande geração de resíduos sólidos, trazendo a necessidade de práticas que visem à minimização das perdas e a sustentabilidade da atividade. Em virtude disso, tem ocorrido um crescimento significativo nos estudos sobre o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos nas últimas décadas, sendo que uma das opções para aplicação desses materiais é na composição de concretos e argamassas, como agregados. Um exemplo de resíduo que tem mostrado essa aplicabilidade, é o pó de mármore, que por ser derivado de um processo industrial, apresenta características mais homogêneas quando comparado as areias naturais. Além disso, possui alta resistência à compressão devido a sua composição majoritariamente calcária, contribuindo para uma melhora no desempenho do concreto. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo verificar o efeito do pó de mármore como filler, analisando concretos com substituição parcial da areia natural na produção de blocos para pavimentação. Para averiguar a melhor proporção de substituição, foram realizados ensaios em três concretos, sendo um de referência e outros dois experimentais, com 15% e 25% de substituição da massa de areia natural por pó de mármore, respectivamente. Nesse âmbito, os resultados apontaram uma melhora da consistência, da absorção e da resistência à compressão para ambos os traços experimentais, e no caso do teor de absorção a melhora se mostrou mais substancial para a substituição de 25% do percentual de areia natural. Pode-se dizer que isso é devido a redução dos vazios, proporcionada pelo aumento do teor de filler advindo da adição de pó de mármore ao concreto. Outras propriedades, como o módulo de elasticidade e massa específica, não apresentaram variação dos resultados com a substituição do agregado natural. A análise microscópica das misturas também assinalou melhora com a substituição, constatada pela diminuição de porosidade e microfissuras. Para os ensaios que envolviam média dos resultados, realizou-se uma análise de variância (One-Way ANOVA), a fim de validar os resultados e conferir maior credibilidade à pesquisa. Dessa forma, conclui-se que os concretos experimentais atenderam aos requisitos normativos de resistência e absorção, revelando seu elevado potencial de aplicação na produção de blocos de concreto para pavimentação.

Palavras-chave: Pó de Mármore. Filler. Bloco de Pavimentação. Concreto. Empacotamento.

ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors that represents the greatest potential in the generation of wealth and jobs in the world. However, as a result of its economic relevance, it is one of the most impactful segments to the environment. This is due to the extraction of natural resources and the large generation of solid waste, leading to the need for practices aimed at minimizing waste and sustaining the activity. Therefore, there has been a significant growth in studies on the reuse and recycling of waste materials in recent decades, and one of the options for use of these materials is in the composition of concrete and mortar, as aggregates. An example of waste that has shown this applicability is marble dust which presents more homogeneous characteristics when compared to natural sands, since it is a by-product of an industrial process. In addition, that material shows high compressive strength due to its mostly limestone composition, contributing to an improvement in concrete performance. In this context, the present work aims to verify the effect of marble dust as a filler, analyzing concrete with partial replacement of natural sand in the production of paving blocks. In order to determine the best ratio of replacement, tests were carried out on three concretes, one of which was a reference and two were experimental, with 15% and 25% of replacement of the natural sand mass by marble powder, respectively. In this context, the results showed an improvement in compressive strength, absorption and, consistency for both experimental mixtures, and in the case of absorption content, the improvement was more substantial for the 25% replacement of natural sand. It can be said that this is due to the reduction of air voids, caused by the increase in the filler content from the addition of marble powder to the concrete. Other properties, such as the modulus of elasticity and specific mass, did not vary show any variation in the results with the replacement of the natural aggregate. The microscopic analysis of the mixtures also showed an improvement with the replacement, verified by the reduction of porosity and microcracks. For the tests that involved the average of the results, an analysis of variance (One-Way ANOVA) was performed, in order to validate the results and give greater credibility to the research. Therefore, it is concluded that the experimental concretes met the normative requirements for strength and absorption, indicating their high application potential in the production of concrete blocks for paving.

Keywords: Marble Dust. Filler. Paving Block. Concrete. Packaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimento intertravado.....	23
Figura 2 - Sistema de intertravamento.....	24
Figura 3 - Processo de exploração de rochas ornamentais.....	30
Figura 4 - Corte de blocos em tear tradicional.....	31
Figura 5 - Lagoa de decantação.....	31
Figura 6 - Otimização de uma mistura pelo empacotamento de partículas.....	37
Figura 7 - a) distribuição bimodal; b) distribuição polimodal.....	38
Figura 8 - Cimento utilizado.....	45
Figura 9 - Agregados utilizados.....	46
Figura 10 - Materiais pesados e devidamente separados.....	60
Figura 11 - Formas com desmoldante.....	61
Figura 12 - Agregado miúdo em condição saturada com superfície seca.....	61
Figura 13 - Agregado graúdo em condição saturada com superfície seca.....	61
Figura 14 - Materiais sendo adicionados a betoneira.....	62
Figura 15 - Mistura pronta.....	62
Figura 16 - Enchimento do molde.....	63
Figura 17 - Medição do abatimento.....	63
Figura 18 - Moldagem dos CP's prismáticos.....	64
Figura 19 - Formas depois da moldagem.....	64
Figura 20 - Formas cobertas por panos úmidos.....	65
Figura 21 - Corpos de prova imersos em água.....	65
Figura 22 - Corpos de prova após o processo de cura.....	66
Figura 23 - Capeamento dos CP's cilíndricos.....	66
Figura 24 - Capeamento dos CP's prismáticos.....	67
Figura 25 - Pesagem do corpo de prova saturado com superfície seca.....	68
Figura 26 - Pesagem do corpo de prova seco.....	68
Figura 27 - Pesagem do corpo de prova submerso.....	69
Figura 28 - Procec Pundit Lab+ utilizado.....	69
Figura 29 - Medição da velocidade.....	70
Figura 30 - Contenco Pavitest utilizada.....	71
Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova para o rompimento.....	71

Figura 32 - Strain Gauge colocado no corpo de prova.	72
Figura 33 - Corpo de prova posicionado na prensa.	73
Figura 34 - Ruptura do corpo de prova cilíndrico.	73
Figura 35 - Amostra utilizada nos ensaios de microscopia.	74
Figura 36 - Microscópio Quanta 250.	75
Figura 37 - Micrografias de 200x e 1000x, respectivamente, destacando a visão geral e a zona de transição entre matriz e agregado do concreto.	88
Figura 38 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T ₀	88
Figura 39 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T ₁₅	88
Figura 40 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T ₂₅	89
Figura 41 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T ₀ ilustrando as microfissuras existentes.	89
Figura 42 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T ₁₅ ilustrando as microfissuras existentes.	90
Figura 43 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T ₂₅ ilustrando as microfissuras existentes.	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção mundial de rochas ornamentais.....	29
Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia natural.	50
Gráfico 3 - Curva granulométrica da areia artificial.....	51
Gráfico 4 - Curva granulométrica do pó de mármore.	52
Gráfico 5 - Comparativo das curvas granulométricas dos agregados miúdos.....	53
Gráfico 6 - Curva granulométrica da brita 0.....	54
Gráfico 7 - Curva granulométrica da brita 1.....	55
Gráfico 8 - Comparativo das curvas granulométricas dos agregados graúdos.....	55
Gráfico 9 - Curva comparativa dos percentuais passantes.	59
Gráfico 10 - Comparação dos resultados do ensaio de consistência.	78
Gráfico 11 - Comparação dos resultados de absorção de água.	79
Gráfico 12 - Comparação dos resultados de massa específica.	81
Gráfico 13 - Comparação dos resultados de velocidade de onda ultrassônica.....	82
Gráfico 14 - Comparação dos resultados de resistência a compressão.	84
Gráfico 15 - Comparação dos resultados de módulo de elasticidade.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de rochas ornamentais.....	28
Tabela 2 - Massa específica dos agregados.....	47
Tabela 3 - Massa unitária dos agregados.....	48
Tabela 4 - Teor de finos dos agregados.....	49
Tabela 5 - Granulometria areia natural.....	50
Tabela 6 - Granulometria areia artificial.....	51
Tabela 7 - Granulometria pó de mármore.....	52
Tabela 8 - Granulometria da brita 0.....	53
Tabela 9 - Granulometria brita 1.....	54
Tabela 10 - Teor de absorção de água.....	56
Tabela 11 - Traços em massa dos concretos produzidos.....	58
Tabela 12 - Passante percentual estimado em cada peneira (%).	59
Tabela 13 - Tabela resumo dos ensaios realizados nas misturas da pesquisa.....	76
Tabela 14 - Resultados do ensaio de consistência.....	77
Tabela 15 - Resultados do ensaio de absorção.....	79
Tabela 16 - Resultados do ensaio de massa específica.....	80
Tabela 17 - Resultados do ensaio de velocidade de ultrassom.....	82
Tabela 18 - Resultados do ensaio de compressão.....	83
Tabela 19 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	86
Tabela 20 - Passante estimado em cada peneira para os percentuais de substituição.....	104
Tabela 21 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T ₀	105
Tabela 22 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T ₁₅	106
Tabela 23 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T ₂₅	107
Tabela 24 - Resultados individuais do ensaio de ultrassom para cada corpo de prova.....	108
Tabela 25 - Resultados individuais do ensaio de compressão para cada corpo de prova.....	109
Tabela 26 - Resultados individuais do ensaio de módulo para cada corpo de prova.....	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO	15
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.2	MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	CONCRETO: PROPRIEDADES E CONSTITUINTES.....	18
2.1	CONSTITUINTES	18
2.1.1	<i>Aglomerante.....</i>	18
2.1.2	<i>Agregado.....</i>	19
2.1.2.1	Classificação.....	19
2.1.2.2	Propriedades e Características dos Agregados.....	20
2.1.3	<i>Água.....</i>	22
2.1.4	<i>Aditivo.....</i>	22
2.2	BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	23
3	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
3.1	CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO	26
3.2	USO DE RCC COMO AGREGADO.....	27
3.3	PÓ DE MÁRMORE	28
3.3.1	<i>Beneficiamento.....</i>	30
3.3.2	<i>Vantagens.....</i>	32
3.3.3	<i>Desvantagens</i>	32
3.3.4	<i>Aplicações de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais.....</i>	33
4	EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS.....	37
4.1	MODELOS DE EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS	38
4.1.1	<i>Modelo de Andreassen.....</i>	38

4.1.2	<i>Modelo de Furnas</i>	39
4.1.3	<i>Modelo de Andreassen Modificado</i>	40
4.2	EFEITO FILLER	41
5	MATERIAIS E MÉTODOS	44
5.1	MATERIAIS	44
5.1.1	<i>Cimento</i>	44
5.1.2	<i>Agregados</i>	46
5.1.2.1	Massa Específica	47
5.1.2.2	Massa Unitária.....	48
5.1.2.3	Teor de Finos.....	48
5.1.2.4	Composição Granulométrica.....	49
5.1.2.5	Teor de Absorção	55
5.1.3	<i>Aditivo</i>	56
5.1.4	<i>Água</i>	57
5.2	MÉTODOS	57
5.2.1	<i>Dosagem</i>	57
5.2.2	<i>Produção do Concreto</i>	60
5.2.3	<i>Determinação da Consistência</i>	62
5.2.4	<i>Moldagem dos Corpos de Prova</i>	64
5.2.5	<i>Determinação do Teor de Absorção</i>	67
5.2.6	<i>Determinação da Massa Específica</i>	68
5.2.7	<i>Velocidade de Ultrassom</i>	69
5.2.8	<i>Resistência à Compressão Axial</i>	70
5.2.9	<i>Módulo Estático de Elasticidade</i>	71
5.2.10	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	73
6	RESULTADOS E ANÁLISES	76
6.1.	CONSISTÊNCIA.....	77

6.2.	TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	79
6.3.	MASSA ESPECÍFICA	80
6.4.	VELOCIDADE DE ULTRASSOM	82
6.5.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL	83
6.6.	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	85
6.7.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	87
7	CONCLUSÕES.....	92
7.1	TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – PLANILHA DE PASSANTE ESTIMADO PARA CADA PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO.....	104
	APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS.....	105

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é sem dúvida uma das atividades que mais influencia no desenvolvimento social e econômico de um país, contudo, deve-se considerar a expressiva geração de resíduos sólidos ligada a esta atividade, que ocasiona diversos danos ambientais. Esses impactos se devem não só pelo grande consumo de recursos naturais não renováveis, mas também pela degradação promovida pelo descarte dos resíduos em aterros sanitários ou em lixões, que prejudicam a qualidade de vida urbana, sobrecarregam os serviços municipais de limpeza pública e podem trazer riscos à saúde da população (DOMTOTAL, 2018).

Diante desse cenário, vem sendo desenvolvidos estudos de viabilidade de absorção dos resíduos gerados, tanto pelo próprio setor quanto por segmentos industriais, a fim de transformá-los em componentes a serem utilizados nas construções. Uma forma de utilização dos resíduos é incorporando esses materiais reciclados em argamassas e concretos, substituindo parcialmente ou totalmente um componente não renovável, a exemplo dos agregados (SALES e MENDES, 2013).

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais consumido no mundo, e esse sucesso pode ser explicado pelas seguintes características: boa resistência à compressão, custo relativamente reduzido, resistência à água, capacidade de produção de peças com diferentes geometrias, além da possibilidade de incorporar reforços e assim resistir à tração e cisalhamento. Desse modo, considerando que cerca de 30% do volume do concreto são ocupadas pelos agregados miúdos, a sua qualidade é de considerável importância e o consumo desse material é extremamente relevante (BASTOS, 2002).

De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção (ANEPAC), em 2014, a demanda por agregados no setor da construção civil, no Brasil, foi superior a 740 milhões de toneladas, dos quais 59% foi de areia e 41% brita. Já o consumo per capita de agregados no país em 2014 foi de 3,7 toneladas/habitante. Neste mesmo ano, a demanda mundial de agregados foi cerca de 45 bilhões de toneladas (ANEPAC, 2015).

A areia natural, principal material utilizado como agregado miúdo, é oriunda de leitos de rios, várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas e arenitos decompostos. Sendo assim, sua extração acarreta em diversos impactos ambientais, como: alteração da paisagem, supressão da mata ciliar, alteração da calha dos cursos d'água, instabilidade de margens e taludes, e turbidez da água (MENDES, 2016). Além disso, outro obstáculo enfrentado por materiais naturais é a carência destes em determinadas regiões, que

força a extração desses agregados cada vez mais distantes do mercado consumidor, gerando um custo maior desse produto devido ao transporte (MENDES, 2016).

Com isso, as operações de extração de agregado miúdo natural dos leitos de rios vêm sendo coibidas pelos órgãos competentes, coibição que também tem ocorrido na disposição irregular de entulhos, como é popularmente chamado o resíduo de construção. Até então, esse resíduo era, clandestinamente, retirado da obra e dispensado como lixo domiciliar ou disposto em locais como terrenos baldios e margens de rios, gerando assim, uma série de problemas ambientais e sociais (TEODORO, 2013).

A utilização desordenada dos recursos naturais tem levado pesquisadores a estudar materiais alternativos que substituam os componentes do concreto em sua formulação. Tal fato permitiria uma diminuição dos custos de produção e em alguns casos poderia até promover melhoras em certas propriedades do concreto (BISPO e ALMEIDA, 2003). Com efeito, o processo de substituição de agregados naturais por agregados artificiais oriundos de resíduos tem suas vantagens, como: características físicas e químicas mais homogêneas; e redução dos impactos ambientais, tanto dos gerados pela remoção do agregado natural, quanto dos referentes ao descarte dos materiais que até então eram apenas resíduos (BISPO e ALMEIDA, 2003).

Com essa busca por materiais recicláveis que melhorem a durabilidade e o desempenho mecânico do concreto, têm-se desenvolvido estudos de empacotamento dos grãos relacionado à dosagem dos concretos, para, dessa forma, produzir estruturas mais compactas e densas. Além de permitir um aprimoramento das propriedades do concreto, o empacotamento das partículas pode promover benefícios ambientais por meio da diminuição do consumo de cimento na mistura, reduzindo assim, a emissão de poluentes e o consumo energético (LOPES, 2019).

O Brasil é considerado o quarto maior produtor de rochas ornamentais do mundo (dado de 2015) e esses materiais são empregados em vários seguimentos da construção civil, como: na composição de algumas texturas de revestimento em fachadas; nas placas de pisos; na confecção de ladrilhos hidráulicos e nas argamassas de pisos cimentícios (BEZERRA, 2017). Por consequência desta ampla utilização, tem-se uma considerável geração de resíduos de rochas ornamentais, nesse âmbito, Vidal et al. (2013) estimam que só no ano de 2012, foram produzidas cerca de 22 milhões de toneladas de resíduos de rochas ornamentais no país.

Durante a transformação de um bloco (cerca de 10 m^3) em chapas, perde-se $1,5 \text{ m}^3$ nos casqueiros e aparas; e $2,6 \text{ m}^3$ em finos do corte. Ou seja, de 10 m^3 de rocha extraídos do maciço, em média, apenas seis são efetivamente transformados em chapas, o que explica a grande produção de resíduos advindos de rochas ornamentais (VIDAL et. Al., 2013).

O pó de mármore, proveniente da britagem dos rejeitos de placas de mármore da indústria de rochas ornamentais, tem se apresentado como opção de substituição da areia natural como agregado miúdo. Por se tratar de um material extremamente fino, sua utilização como filler tem se mostrado uma alternativa promissora para otimizar o empacotamento dos grãos (grãos menores ocupando os vazios deixados pelos grãos maiores). Além de auxiliar no empacotamento dos grãos, esse tipo de material proporciona o chamado efeito de nucleação, que acelera a hidratação dos componentes do clínquer pelo fornecimento de novos sítios de nucleação (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 10004 (2004) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o pó de mármore é um resíduo classificado como Classe II B – Inerte, dessa forma, seu emprego na construção civil não causa risco ambiental e nem a saúde humana. Dentro deste contexto, menciona-se, que o pó de mármore é encontrado em faixas de granulometrias distintas, sendo a faixa granulométrica com grande percentual de finos passantes na peneira n°. 100 (150 μ m), a mais utilizada (LOPES e FIGUEIREDO, 2006).

A grande preocupação relacionada ao desenvolvimento de novos materiais é a necessidade de investigações quanto à qualidade, durabilidade e viabilidade de utilização dos mesmos, uma vez que esses são aspectos extremamente importantes quando se trata de produtos da construção civil (BEZERRA, 2010).

Dito isso, a inexistência de uma normatização para a utilização do pó de mármore como agregado miúdo tem por consequência uma dificuldade de padronização e controle de qualidade dos concretos produzidos a partir desse material.

Sendo assim, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para verificar a viabilidade técnica-econômica do pó de mármore na produção de argamassas, concretos convencionais e auto adensáveis, visando ampliar a área de estudo do emprego desse material. Este é o caso do presente trabalho, que propõe um olhar investigativo sobre a perspectiva da utilização de pó de mármore como filler, em substituição parcial à areia natural na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

1.1 OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo geral analisar o comportamento físico e mecânico da adição de filler de mármore em substituição parcial da fração de areia natural na fabricação de blocos de concreto para pavimentação; verificando também o efeito do empacotamento das

partículas com a adição do pó de mármore. A análise será feita pela comparação de algumas propriedades físicas e mecânicas de concretos experimentais com um concreto de referência.

1.1.1 Objetivos Específicos

Visando complementar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) otimizar misturas de concreto com base no conceito de empacotamento de partículas por meio do modelo de Andreassen Modificado;
- b) identificar o comportamento da consistência do concreto no estado fresco através do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test);
- c) avaliar a influência do filler de mármore na porosidade do concreto por meio do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico;
- d) avaliar a influência do filler de mármore na absorção água do concreto;
- e) determinar o aumento percentual da massa específica dos corpos de prova de concreto com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore;
- f) avaliar a influência do filler de mármore na resistência à compressão do concreto;
- g) avaliar a influência do filler de mármore no módulo de elasticidade do concreto;
- h) analisar a microestrutura do concreto através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- i) definir as dosagens que apresentem características finais do concreto semelhantes ou melhores que o concreto de referência.

1.2 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A indústria da construção civil, como qualquer outro setor, está sempre em busca de reduzir os custos de produção. Isto associado ao déficit habitacional presente no país atualmente, bem como a escassez de recursos naturais, torna o reaproveitamento de recursos disponíveis primordial à sobrevivência do planeta.

Além do ponto de vista econômico, existe o fator ambiental, uma vez que a construção civil é um dos setores que mais gera resíduos sólidos no mundo. Além disso, a deposição indiscriminada de entulhos acarreta na degradação de áreas urbanas e na rápida saturação dos aterros. Não bastando, há ainda o grande impacto ambiental causado durante a exploração de

recursos naturais, a exemplo do assoreamento de rios e córregos, de onde são extraídos a maioria dos agregados.

Estes pontos citados acima, associados à grande oferta do pó de mármore encontrada no Brasil e a falta de normatização para o controle de qualidade de concretos produzidos com esse material, justifica o presente estudo e sua busca para utilizar o pó de mármore como alternativa à de areia natural como agregado miúdo na composição de blocos de concreto para pavimentação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. Primeiramente, no Capítulo 1, é feita uma breve introdução, contextualizando o tema, justificando a relevância da pesquisa e apontando seus objetivos.

Nos três capítulos seguintes, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica em relação aos conceitos importantes para o entendimento do trabalho. O Capítulo 2, especificamente, traz uma caracterização mais aprofundada sobre concreto e seus constituintes assim como blocos de concreto utilizados para pavimentação.

O Capítulo 3 discorre sobre resíduos de construção civil, seu uso como agregado e aborda de forma mais detalhada sobre o resíduo originário de marmorarias, o pó de mármore.

Já no Capítulo 4 é discutido o empacotamento dos grãos, bem como os modelos de empacotamento ótimo, além de abordar o efeito filler.

No Capítulo 5, são indicadas as caracterizações dos materiais empregados; além disso, são descritos todos os procedimentos que foram realizados, as variáveis utilizadas, incluindo os métodos que foram seguidos, desde a dosagem até os ensaios normatizados que caracterizam os concretos estudados.

Já o capítulo 6, apresenta os resultados dos ensaios realizados na pesquisa, além de abordar algumas discussões e análises acerca dos mesmos.

O Capítulo 7, apresenta as considerações finais em relação ao estudo, trazendo as conclusões sobre a possibilidade ou não, do uso do agregado em questão, bem como sugestões de trabalhos futuros que possam complementar a pesquisa.

Em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para embasar a discussão feita na pesquisa. Por último, no apêndice, são trazidas tabelas com os resultados individuais dos ensaios de cada corpo de prova.

2 CONCRETO: PROPRIEDADES E CONSTITUINTES

Mehta e Monteiro (2014) apontam o concreto como o material de construção civil mais empregado no mundo, com consumo anual girando em torno de 19 bilhões de toneladas, isto representa o segundo em volume consumido pelo homem, ficando atrás somente da água. Apesar de não se mostrar tão resistente quanto o aço, o baixo custo de produção aliado à rápida disponibilidade para obra, a boa durabilidade ao ser exposto a água e a facilidade de obtenção de elementos estruturais com certa variedade e tamanho de fôrmas, colocam este material no topo do consumo de matéria-prima.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os concretos podem ser divididos em três categorias, de acordo com a resistência à compressão aos 28 dias:

- a) baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- b) resistência moderada: resistência à compressão de 20 MPa a 40 MPa;
- c) alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Considera-se o concreto como um sólido a partir da pega, é um material em perpétua evolução; sensível às modificações físicas, químicas, ambientais e mecânicas (BAUER, 1994). Ele é o produto resultante do endurecimento de uma mistura adequadamente proporcionada de aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivo (opcional). E suas propriedades são diretamente influenciadas pelas características desses materiais constituintes.

2.1 CONSTITUINTES

Os concretos geralmente são constituídos de quatro materiais: aglomerante, agregado, água e aditivo.

2.1.1 *Aglomerante*

Aglomerante é conceituado como um material quimicamente ativo, que em contato com água sofre uma reação e forma uma pasta para promover a ligação entre os agregados presentes na mistura (ALVES, 2006). Ambrozewicz (2012) realça o cimento Portland como o aglomerante mais utilizado na construção civil, graças às suas características como: propriedades mecânicas satisfatórias, rápido endurecimento e formação de um material com boa resistência à água.

Conforme a norma NBR 16.697 (2018), o cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Durante a moagem, é permitida a adição de misturas como: pozolanas, escórias de alto-forno, e/ou materiais carbonáticos; a fim de propiciar características distintas ao concreto de cimento Portland.

2.1.2 Agregado

Newman e Choo (2003) apontam os agregados como materiais relativamente baratos, que ocupam cerca de 75% do volume total de concreto. Como estes não apresentam reações químicas complexas com a água, além de não interferir significativamente nas interações do concreto com o aço e do concreto com o meio; usualmente é tratado como um material inerte de enchimento.

Levando em conta essa alta representatividade no volume de concreto, a utilização de agregados é considerada antes de mais nada, uma medida econômica, uma vez que sua incorporação à mistura, possibilita um menor consumo de cimento (parcela mais onerosa do processo produtivo) e, por conseguinte, uma diminuição no valor unitário do metro cúbico de concreto. Destarte, a proporção entre agregados e cimento deve ser tal que proporcione um desempenho satisfatório do concreto, de acordo com seu propósito, apresentando o melhor custo benefício de produção (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Porém, ao contrário do que se acreditava, os agregados não têm apresentado uma mera função econômica, proporcionando, até mesmo, aprimoramento e enriquecimento da mistura. Por certo, esses materiais influenciam diretamente em algumas das propriedades do concreto, tais como resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade, o que realça sua importância e a consequente necessidade de seleção de agregados de qualidade (NEVILLE, 2016).

2.1.2.1 Classificação

Existem diversas formas distintas de classificação dos agregados, as mais recorrentes e difundidas no meio acadêmico são: quanto a obtenção, massa específica e granulometria.

Quanto a obtenção, os agregados são divididos em naturais, aqueles encontrados na natureza já na forma de agregados (areia de mina, areia de rio, seixo rolado e pedregulho); britados, obtidos pelo processo de britagem (pedra britada, pedrisco e pó de pedra); ou industrializados, obtidos por processos industriais (poliestireno expandido, argila expandida,

cinza leve e vermiculita) (BASTOS, 2002). Mendes (2016) aponta ainda, os agregados obtidos por meio da reciclagem de outros materiais, como entulho de construção civil, ou através de materiais alternativos descartados por outras atividades.

Já quanto a massa específica os agregados são classificados em três categorias, leves, normais e pesados. Os leves são aqueles com massa unitária menor que 2.000 kg/m^3 (vermiculita e argila expandida); enquanto os normais possuem massa unitária entre 2.000 kg/m^3 e 3.000 kg/m^3 (areias e pedregulhos); por fim, os agregados pesados que têm massa unitária superior a 3.000 kg/m^3 (barita, magnetita e hematita) (AMBROZEWICZ, 2012).

A classificação dos agregados quanto a granulometria é a mais recorrente e usual; de acordo com a NBR 7211 (2009), agregados graúdos, são aqueles com dimensões entre 4,75 mm e 75 mm, como exemplo, pode-se citar a brita, agregado graúdo mais empregado na construção civil. Em contrapartida, os agregados miúdos, segundo o estabelecido pela NBR 7211 (2009), apresentam partículas com granulometria superior a 0,15 mm e inferior 4,75 mm, o exemplo mais comum no setor de construção é a areia natural (PINHEIRO e CRIVELARO, 2016).

2.1.2.2 Propriedades e Características dos Agregados

Os agregados derivam artificialmente do processo de britagem ou naturalmente do intemperismo e abrasão das rochas. Assim, o comportamento de um agregado, seja ele artificial ou natural está diretamente ligado as suas características, tais como à composição química e mineral, granulometria, massa específica, dureza, resistência, porosidade, tamanho, forma e textura; pois estas características interferem na aderência da pasta com o agregado e no consumo de água na preparação da mistura. (NEVILLE, 2016).

Dito isto, o conhecimento e entendimento das diversas características e propriedades dos agregados são fundamentais para a sua aplicação em concretos. De forma que a análise das características físicas e químicas dos agregados, permite encontrar o traço adequado para produção do concreto de acordo com o projeto, desde que seja respeitado o que é preconizado pelas normas vigentes (NEVILLE, 2016).

Mehta e Monteiro (2014) propõem a classificação de algumas das propriedades dos agregados da seguinte forma:

- a) propriedades dependentes da porosidade do material: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza e módulo de elasticidade;
- b) propriedades dependentes das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;

- c) propriedades dependentes da composição química e mineralógica: resistência mecânica, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias;
- d) propriedades influenciadoras no estado fresco do concreto: porosidade, composição granulométrica, forma e textura dos grãos;
- e) propriedades influenciadoras no estado endurecido do concreto: porosidade e composição mineralógica.

A presença de poros internos nas partículas, a porosidade, determina a capacidade de absorção de água destas e por consequência deve ser considerada durante a dosagem dos concretos. Ademais, a resistência à compressão, resistência à abrasão e o módulo de elasticidade são características dos agregados que influenciam fortemente nas propriedades mecânicas finais do concreto; tornando necessária a avaliação criteriosa desses aspectos (MAMLOUK e ZANIEWSKI, 2014).

A forma geométrica dos agregados tem grande influência na qualidade dos concretos, afetando a trabalhabilidade, o ângulo de atrito interno no estado fresco, a compacidade e as propriedades que dependem da quantidade de água de amassamento.

De acordo com Poole e Sims (2016), as partículas angulosas (com baixo valor de curvatura) e com elevada esfericidade são as ideais para produção de concretos e argamassas, quando comparadas com as lamelares ou alongadas. Já outros autores, a exemplo de Coutinho e Gonçalves (1973), recomendam a utilização de agregados com grãos arredondados, pois a quantidade de água necessária para mistura é menor e a trabalhabilidade para este formato em geral é melhor.

A composição granulométrica de um agregado pode ser entendida como a proporção relativa das dimensões dos grãos de determinado agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência, de forma simplificada, é a distribuição dos diversos tamanhos de grãos, em percentual (BAUER, 1994).

A granulometria dos agregados afeta nas propriedades do concreto, de tal modo que agregados grosseiros produzem misturas ásperas, pouco trabalháveis e com risco de segregação; enquanto aqueles situados em faixas granulométricas mais finas apresentam uma demanda por água e um consumo de cimento consideravelmente maiores (devido à maior área superficial), tornando-os economicamente inviáveis (MAMLOUK e ZANIEWSKI, 2014).

Assim sendo, Li (2011) enfatiza a importância da dimensão máxima do agregado e a necessidade de obter materiais com granulometrias contínuas (partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões da menor à maior), pois isto permite o empacotamento dos grãos do agregado na mistura de concreto.

Por conseguinte, sempre que possível, é viável que se façam composições de agregados miúdos, de modo que se obtenha um material com características granulométricas o mais próximo possível das especificações de limites ou faixas granulométricas prescritas pela NBR 7211 (2009). Entretanto, a norma traz a ressalva de que podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas (zonas ótima e utilizável), desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

2.1.3 *Água*

As impurezas contidas na água podem prejudicar a qualidade e durabilidade do concreto, diminuindo sua resistência, causando manchas em sua superfície, ou propiciando à corrosão das armaduras. Desta forma, deve-se dar atenção à qualidade da água para amassamento e para cura do concreto, sendo recomendada a água com PH de 6,0 a 8,0 ou, possivelmente, até 9,0 (NEVILLE, 2016).

Entretanto, Mehta e Monteiro (2014) asseguram que via de regra, uma água ácida, alcalina, salgada, salobra, colorida ou com mau cheiro não deve ser imediatamente rejeitada. Esta ressalva é importante, porque águas recicladas da mineração e de operações industriais em alguns casos podem ser usadas como água de amassamento para o concreto. A melhor forma de se determinar a aptidão de uma água é por meio de ensaios, comparando o tempo de pega do cimento e a resistência de corpos-de-prova de argamassa feitos com a água desconhecida e com uma água limpa de referência.

2.1.4 *Aditivo*

Em decorrência do avanço tecnológico e das novas exigências atribuídas ao concreto, são adicionados aditivos aos materiais básicos (cimento, agregados e água). A NBR 11.768 (2019) define os aditivos como produtos que quando adicionados aos concretos e argamassas de cimento Portland modificam algumas das suas propriedades com intuito de uma melhor adequação à determinadas condições. Os aditivos para concretos mais conhecidos são:

- a) aditivo plastificante – aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento;
- b) aditivo retardador – aumenta os tempos de início e final de pega do concreto;

- c) aditivo acelerador – diminui os tempos de início e fim de pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais;
- d) aditivos incorporadores de ar – incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto;
- e) aditivo superplastificante – aumenta drasticamente o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento.

2.2 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Segundo a NBR 9781 (2013) pisos intertravados são definidos como uma camada de revestimento formada por peças de concreto (blocos maciços pré-fabricados) justapostas em uma camada de assentamento sobre uma camada de base e sub-base. É considerado um pavimento flexível, com juntas preenchidas por um material de rejuntamento e o intertravamento das peças é propiciado pela contenção lateral (geralmente o meio fio). Os blocos de concreto também são chamados de pavers ou paviess. A Figura 1 representa uma seção transversal típica deste pavimento.

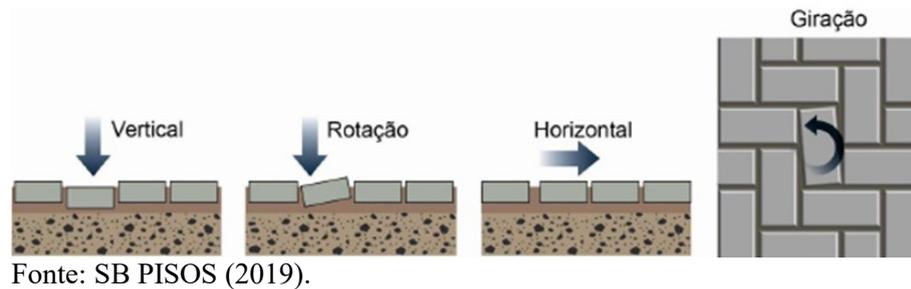
Figura 1 - Pavimento intertravado.



Fonte: SILVA e MARCHIONI (2011).

O intertravamento é a capacidade dos blocos em resistir aos movimentos de deslocamento das peças individualmente, tanto vertical, de rotação, horizontal, quanto de giração em relação às peças adjacentes, como ilustra a Figura 2. Os pavers vem conquistando espaço em todo o país, à custa das vantagens que o sistema oferece, como a alta resistência e durabilidade; se forem seguidos alguns requisitos básicos (sub-base bem executada, blocos de qualidade e assentamento correto), um pavimento de pavers pode apresentar uma vida útil de 25 anos (FIORITI, 2007).

Figura 2 - Sistema de intertravamento.



Ademais da durabilidade apresentada por este material, ele se destaca também pela eficiência ambiental, uma vez que possibilita a utilização de resíduos em sua composição, além de melhorar a drenagem urbana por ser semipermeável. Sendo ressaltadas ainda, as seguintes propriedades dos blocos de concreto (ARY JUNIOR, 2007):

- a) menor absorção da luz solar, evitando a elevação exagerada da temperatura ambiente;
- b) valor paisagístico;
- c) boa capacidade estrutural;
- d) fácil reparo quando ocorre recalque no subleito que comprometa a capacidade estrutural do pavimento;
- e) fácil acesso a serviços subterrâneos e o reparo não deixa marcas visíveis;
- f) possibilidade de reutilização dos blocos;
- g) não há necessidade de mão de obra especializada;
- h) os materiais chegam à obra prontos para a aplicação;
- i) liberação rápida do tráfego, logo após a conclusão.

A fabricação dos pavers pode ser feita em qualquer formato, alguns modelos se destacam por serem mais utilizados, mas também não há um consenso entre os estudiosos sobre qual o melhor formato dos blocos intertravados. Porém, como os diferentes padrões geométricos têm influência no modo de assentamento das peças, a única recomendação com relação ao formato dos blocos é que ele permita a realização do assentamento em combinação bidirecional (WIEBBELLING, 2015).

De acordo com Wiebbelling (2015), a espessura da camada do pavimento intertravado é variável (geralmente 6cm, 8cm ou 10cm), e depende das seguintes características: da intensidade do tráfego a que estará sujeito, das características do terreno de fundação e da qualidade dos materiais constituintes das demais camadas.

Conforme o preconizado pela NBR 9781 (2013), para produção dos pisos intertravados, a dosagem do concreto utilizado – composto por cimento Portland, agregados e água (aditivos e pigmentos são opcionais) – é feita de acordo com o tráfego no local da

implementação. Vias sujeitas ao fluxo de pedestres e veículos leves demandam uma resistência à compressão mínima de 35 MPa, em contrapartida, vias expostas à tráfegos pesados, demandam resistências superiores à 50 MPa.

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil apresenta-se como um dos maiores setores da economia mundial, pois propicia não só a geração de emprego e renda; mas também proporciona o desenvolvimento de infraestrutura para os demais segmentos. Em contrapartida, o setor da construção notabiliza-se como o maior gerador de resíduos de qualquer economia (JOHN, 2000).

A Resolução nº 307 do CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente - (2002) e a norma NBR 15116 da ABNT (2004) trazem uma conceituação completa e adequada dos Resíduos de Construção Civil (RCC), também conhecidos como Resíduos de Construção e Demolição (RCD), definindo-os como todos os materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. São comumente chamados de metralha, caliça ou entulhos de obras.

3.1 CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO

Segundo a NBR 10004 da ABNT (2004), os resíduos são classificados de acordo com a atividade ou processo que lhes deu origem; quanto aos seus constituintes e características; e quanto a comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. Para os efeitos desta norma, os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que, devido às suas características de inflamabilidade, toxicidade, reatividade, radioatividade, corrosidade e patogenicidade em geral, representam riscos à saúde pública ou são capazes de ocasionar impactos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos sem os cuidados apropriados;
- b) Resíduos classe II – Não Perigosos, que por sua vez se subdividem em:
 - Resíduos classe II A - Não Inertes: são aqueles não enquadrados pela classe I ou pela II B;
 - Resíduos classe II B - Inertes: são aqueles que quando submetidos a contato com água destilada ou desionizada, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Os resíduos sólidos da construção civil se enquadram, nessa classificação, como “classe II B - não perigosos e inertes”.

Em se tratando de sua composição, os RCD apresentam uma grande diversidade de materiais que podem formá-lo, Leite (2001) ressalta a importância da origem do resíduo nesse quesito, se é proveniente de atividades relacionadas à construção (construção de edifícios, reformas e reparos em residências, edificações comerciais, industriais e outras estruturas); se é resíduo de demolição (destruição de construções e de outras estruturas); ou ainda se ele é proveniente de procedimentos de extração de materiais para construção (rejeitos de jazidas).

3.2 USO DE RCC COMO AGREGADO

Sales e Mendes (2013), indicam que a construção civil, além da intensa geração de resíduos, consome grandes quantidades dos recursos naturais, essa problemática se intensifica diante dos modelos atuais de produção, onde as matérias-primas utilizadas são, em sua grande maioria, não renováveis.

Visando a preservação ambiental e a sustentabilidade, a construção civil vem adquirindo novos conceitos e soluções técnicas, uma das mais fundamentais é a reciclagem de resíduos, que é vista, no setor, com grande potencial de utilização. Dentre os evidentes benefícios que a reciclagem oferece, destaca-se a moderação no consumo de recursos naturais não-renováveis; a minimização de volume de resíduos transportados, diminuindo as áreas necessárias para aterro; a redução do consumo de energia durante o processo de produção e a consequente mitigação da poluição causada pela disposição indevida dos RCC (PASCHOALIN FILHO et al., 2014).

Tendo em vista que geralmente os RCD são inertes, uma maneira de utilizá-los é incorporando em argamassas e concretos, substituindo parcial ou totalmente, um componente não renovável por eles. Sendo que o reaproveitamento como agregado de variadas granulometrias, uso mais comum dado ao RCC, se mostra uma alternativa viável aos agregados de origem natural. Em alguns casos, essa opção permite a valorização, conceito empregado quando se tem pretensão de agregar valor econômico ao resíduo (SALES e MENDES, 2013).

A composição química do RCC é um indicador de sua compatibilidade com as matrizes cimentícias, e para alguns resíduos, a exemplo do pó de mármore, sua forma granular com elevada finura, aponta esse material com potencial de utilização como adição mineral em concretos e argamassas, agindo como filler (NOBREGA, 2015).

Segundo Bezerra et al. (2010), o desenvolvimento de novos materiais envolve uma grande preocupação, que é a necessidade de investigação quanto aos aspectos importantes para construção civil, a exemplo da qualidade, durabilidade e viabilidade de utilização destes novos materiais. Em relação a este mesmo ponto, Souza et al. (2004), aborda que o produto reciclado precisa estar de acordo com às solicitações a que será submetido; e ao que é preconizado pelas normas da ABNT, pois isso traz segurança e confiança aos profissionais da construção civil ao empregar esses materiais nas obras.

O emprego de agregados reciclados de RCD na produção de concretos possui grande potencial, e é de excepcional importância ao meio ambiente. Entretanto, apesar dos avanços consideráveis envolvendo esse tema, algumas regiões ainda precisam enfrentar uma mudança de mentalidade nos setores público e privado. Isso porque as iniciativas e pesquisas de novas tecnologias que não são convertidas em grandes vantagens financeiras no curto prazo, ainda enfrentam certa resistência na construção civil e não geram grande mobilização do setor (ARAÚJO, 2016).

3.3 PÓ DE MÁRMORE

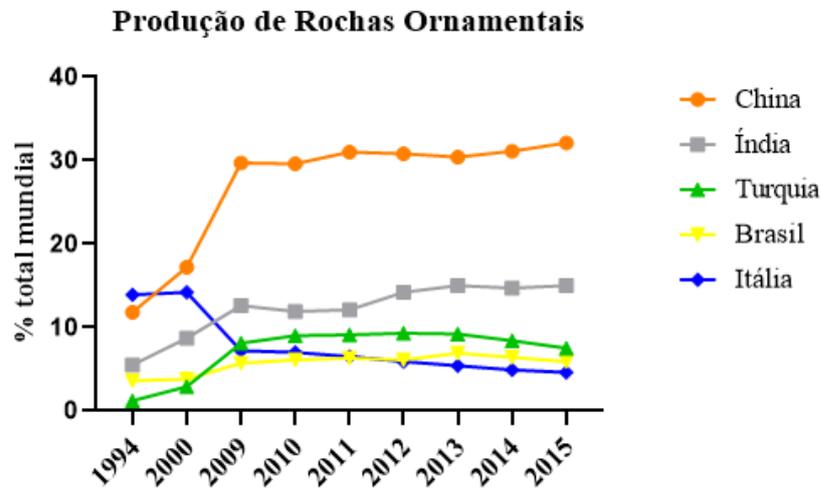
No Brasil, a mineração de rochas ornamentais produz 8,2 milhões de toneladas por ano (dado de 2015), ocupando assim, a quarta posição no ranking de maiores produtores mundiais nesse segmento, como mostra a Tabela 1 e o Gráfico 1. A Construção Civil representa o principal destino das rochas ornamentais, empregando 75% do total da produção líquida da indústria da pedra, com destaque comercial para as rochas carbonáticas, que apresentam proporção elevada de carbonatos de cálcio (a exemplo do mármore), e as rochas silicáticas, que apresentam proporção elevada de óxido de silício (como o granito) (BEZERRA, 2017).

Tabela 1 - Produção mundial de rochas ornamentais.

Principais Países na Produção Mundial de rochas Ornamentais									
Ano	1994	2000	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
China (%)	11,8	17,2	29,7	29,6	31	30,8	30,4	31,1	32,1
Índia (%)	5,5	8,7	12,6	11,9	12,1	14,2	15	14,7	15
Turquia (%)	1,2	2,9	8,1	9	9,1	9,3	9,2	8,4	7,5
Brasil (%)	3,6	3,8	5,7	6,1	6,3	6,1	6,9	6,4	5,9
Itália (%)	13,9	14,2	7,2	7	6,5	5,9	5,4	4,9	4,6
Produção mundial (milhões de toneladas)	55	59,65	104,5	111,5	116	123,5	130	136,5	140

Fonte: Adaptado de BEZERRA (2017).

Gráfico 1 - Produção mundial de rochas ornamentais.



Fonte: Adaptado de BEZERRA (2017).

A produção nacional de resíduos de corte e beneficiamento de mármore, gira em torno centenas de milhares de toneladas por ano, graças ao valor econômico representativo desta atividade produtiva, associada ao aumento considerável na exploração brasileira nos últimos anos. Vidal et al. (2013), apontam que durante o beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais, há uma estimativa de perda de material correspondente a 40% do volume do bloco processado, sendo 26% de resíduo muito fino (pó de rocha) e 14% de resíduo grosso.

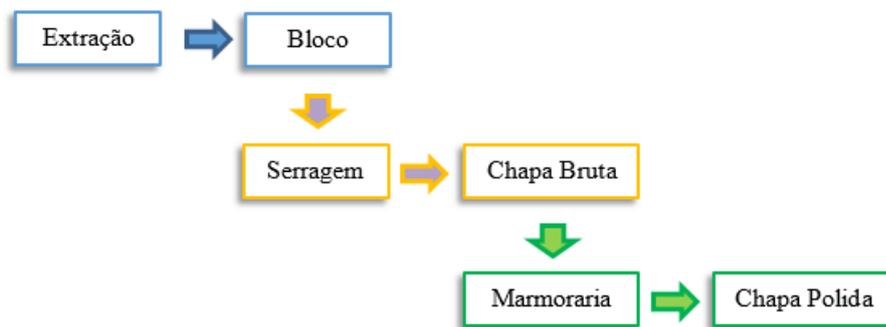
O pó de mármore consiste em um resíduo inerte provindo da moagem ou britagem da rocha calcária, e sua utilização atende seguimentos distintos do mercado, além de ser empregado na agricultura para corrigir a acidez do solo (processo chamado de calagem), também é usado como matéria-prima em artesanatos (OLIVEIRA, 2007). Todavia, é na construção civil, principalmente na linha de pavimentação e revestimentos de pisos e paredes, que esse material vem conquistando espaço importante sendo usado como agregado miúdo por se comportar como filler (GONÇALVES, 2000 apud NOBREGA et al., 2015).

A disponibilidade do pó de mármore encontra-se em faixas granulométricas distintas, o produto geralmente é encontrado nas faixas das peneiras de malha #08, #10, #20 e #40 (2,38mm, 2,00mm, 0,84mm e 0,42mm respectivamente), não sendo vendido numa faixa granulométrica equivalente à da areia natural (OLIVEIRA, 2007). Entretanto, em algumas mineradoras, existem projetos para produzir uma areia britada de rocha calcária (pó de mármore) com granulometria que atenda as prescrições das normas da ABNT para agregado miúdo.

3.3.1 Beneficiamento

O processo para a obtenção de rochas ornamentais é dividido em três etapas, são elas: mineração (exploração da rocha), serraria (transformação dos blocos em chapas), e marmoraria (corte das chapas seguido do polimento e acabamento das peças) (BEZERRA, 2017). A Figura 3 representa de forma esquemática esses processos.

Figura 3 - Processo de exploração de rochas ornamentais.



Fonte: PEREIRA (2019).

Após o descobrimento da jazida, o primeiro passo é desenvolver um estudo geológico a fim de verificar a qualidade e o potencial de aproveitamento do material, para desta forma selecionar o método mais adequado de lavra. Em geral, a extração é feita em blocos dos mais variados tamanhos, para otimizar o processo de beneficiamento e reduzir as perdas de material (VIDAL et al., 2013).

Vidal et al. (2013) aponta que a maneira como a lavra é feita depende de alguns fatores, como o grau de faturamento do maciço rochoso, sua morfologia, sua estabilidade estrutural com o volume da reserva mineral e até mesmo com a localização geográfica da jazida. Ressalta-se que os métodos de exploração mais comuns são as lavras: seletiva, de painéis verticais, por desmoronamento, subterrânea, de matacões e de bancadas altas ou baixas.

Posteriormente à lavra, os blocos passam por um procedimento chamado de desdobramento, onde são colocados em teares, com barras de aço e material abrasivo (água, cal hidratada e granalhas de aço), lá são cortados em placas pelo atrito, a Figura 4 ilustra esse procedimento. Durante os cortes, o pó da rocha se mistura com a cal hidratada, que apresenta propriedades ligantes, gerando uma espécie de lama (BARROS et al., 2006).

Figura 4 - Corte de blocos em tear tradicional.



Fonte: BARROS et al. (2006).

Algumas indústrias vêm empregando um novo tipo de tear, com fios diamantados, este apresenta custo inferior em relação aos tradicionais, são tecnologicamente limpos (apenas água e pó de rocha como resíduos), além de possuírem um alto desempenho e um maior controle de qualidade na produção (VIDAL et al., 2013).

Segundo Ponte e Vidal (2005), a lama oriunda dos teares tradicionais é transportada para barragens de rejeitos ou lagoas de decantação (Figura 5), para a evaporação da água e em seguida o material é encaminhado para os “bota-foras” (pátios das empresas, terrenos clandestinos ou caçambas para serem recolhidos). A lavra e desdobramento, juntos são responsáveis por cerca de 83% dos resíduos do processo de exploração das rochas ornamentais, ademais, os rejeitos procedentes dessas duas etapas não estão contaminados por quaisquer substâncias químicas, mantendo amplo seu campo de uso (VIDAL et al., 2013).

Figura 5 - Lagoa de decantação.



Fonte: BARROS et al. (2006).

Na fase final de beneficiamento, a chapa bruta passa por um polimento, e na maioria das vezes são adicionadas resinas e outras substâncias para melhorar o aspecto visual das placas que serão comercializadas e aplicadas com função estética. Sendo assim, os resíduos gerados nas politrizes contém, além da água e do pó de pedra, alguns produtos químicos, qualificando-o como material contaminado e restringindo sua gama de reutilização (BARROS et al., 2006).

Os resíduos considerados limpos gerados pelo processos iniciais, exploração e beneficiamento das rochas, a exemplo do pó de mármore, apresentam viabilidade técnica para uso na construção civil, como estudos prévios podem assegurar. Portanto, seu emprego como agregado miúdo se mostra uma opção.

3.3.2 *Vantagens*

Além das vantagens ambientais, já relatadas, o fato de ser oriundo de um processo de britagem industrial, confere ao pó de mármore uma maior homogeneidade de características físicas e químicas, se comparado por exemplo, com as areias naturais (OLIVEIRA, 2007). Além do mais esse material apresenta grande estabilidade, baixa porosidade e boa resistência à abrasão (NOBREGA et al., 2015).

Oliveira (2007), aponta também, como fatores positivos a ausência de impurezas e a composição química compatível com as matrizes cimentícias (não contém minerais que reagem com o cimento); sendo estes, fatores preponderantes para que não ocorra reação álcalis-agregados nos concretos e argamassas.

Outro benefício para o uso do pó de mármore como agregado miúdo é a capacidade de contribuir razoavelmente para o ganho de resistência dos concretos, o que pode ser explicado não só pelo efeito filler, mas também pela alta resistência à compressão (cerca de 159 MPa), que o material derivado da rocha calcária possui. Com efeito, sendo um agregado de coloração uniformemente branca, possibilita a confecção de argamassas e concretos brancos ou com tonalidades de cores variadas (com uso de pigmentos) (NEVILLE, 2016).

3.3.3 *Desvantagens*

A utilização do pó de mármore como agregado na construção civil, tem como obstáculo a quantidade insuficiente de reservas disponíveis para exploração; uma vez que o consumo anual de areia é muito superior ao volume de resíduo gerado pelas marmorarias, o que impossibilitaria uma substituição total do emprego de areia natural. Outra desvantagem é a falta de popularidade, sua área de utilização ainda é concentrada nas aplicações mais elitizadas da construção civil, não alcançando as esferas mais carentes de consumidores finais (OLIVEIRA, 2007).

3.3.4 Aplicações de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais

Devido à problemática ambiental da extração de materiais naturais, previamente apontada, associada à Política Nacional de Resíduos Sólidos (criada para reduzir a quantidade de resíduos direcionada para aterros e lixões), o número de pesquisas envolvendo a reciclagem e a reutilização de resíduos como matéria-prima na construção civil, tem aumentado substancialmente nos últimos anos, inclusive aquelas que envolvem os Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) (NOBREGA, 2015). Além disso, de acordo com Uliana (2014), em virtude do efeito filler que a aplicação do RBRO proporciona, vem sendo desenvolvidos diferentes estudos com esses resíduos em diversos produtos da construção civil, como blocos, telhas, ladrilhos, argamassas e concretos.

Uma das primeiras pesquisas desenvolvidas no Brasil com utilização de RBRO foi elaborada por Calmon et al. (1997), analisando argamassas de assentamento com substituição da massa de cal em teores de 25%, 50%, 75% e 100% por resíduo. De acordo com os autores, as argamassas no estado fresco apresentaram menor retenção de água e maior exsudação. Quanto aos ensaios realizados no estado endurecido, ocorreram melhorias substanciais em todas as propriedades físicas e mecânicas analisadas. A conclusão foi de que a substituição da cal por rejeito diminuiu a porosidade das misturas, em virtude do efeito filler, o que resultou no aumento da resistência.

Vinco (2017) avaliou a incorporação do RBRO em argamassas de revestimento, e apesar dos resultados não revelarem influência significativa na resistência à compressão, houve uma melhora considerável nas propriedades do concreto fresco (retenção de água, plasticidade, adesão inicial, homogeneidade e trabalhabilidade). A partir dos resultados encontrados, aliados à análise feita em obra e à análise de custo para produção de cada traço estudado, a pesquisa assegura que a incorporação do RBRO em argamassas de revestimento é tecnicamente viável.

Moura e Leite (2011) designam em seu estudo que blocos de vedação com diferentes teores de resíduos de rochas ornamentais apresentaram ótimo desempenho na absorção e na resistência à compressão. Tratando-se especificamente da resistência à compressão média, os resultados para 5%, 10% e 15% de RBRO foram superiores à resistência de referência. Inclusive, para 15% de resíduo o aumento foi cerca de 11%.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição rejeito de mármore triturado na resistência à compressão axial, Coura (2009) verificou que à medida que se aumenta o teor de adição, foi obtido um incremento de até 12,8%. Além disso, uma menor absorção, maior módulo de elasticidade e melhora de trabalhabilidade permitiram ao estudo garantir que a

utilização do resíduo de mármore é eficaz na produção de concretos de baixo custo e de boa qualidade.

Dessa forma, Moura et al. (2002) e Santos et al. (2012) sugerem em seus estudos uma melhoria no desempenho de argamassas quando há substituição dos agregados por resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas e concretos. Além dessas pesquisas, pode-se citar Destefani (2009), que mostrou o emprego do pó de mármore como algo exequível na produção de argamassas, tijolos solo-cimento, blocos e revestimentos cerâmicos. Akbulut e Gürer (2007) também acenam sobre a viabilidade de aplicação do concreto com RBRO como agregado na pavimentação de vias de tráfego leve e médio.

Em seu estudo, Barros (2008) utilizou resíduos do corte de mármore e granito em concretos auto adensáveis (CAA), obtendo CAAs com propriedades de durabilidade melhores que o concreto de referência. Além disso, Dietrich (2015) indica uma diminuição da absorção de água e um retardamento do processo corrosivo do concreto, por consequência da redução do volume de vazios causada pela incorporação de agregado originário dos RBRO.

Almeida et al. (2007) apontam que substituição de aproximadamente 10% de areia natural por resíduos de rochas calcárias acarreta no aumento da resistência à compressão do concreto. Em contrapartida, outros estudos apontam que a fluidez pode vir a diminuir com a adição de RBRO, gerando a necessidade de aditivos superplastificantes para garantir a trabalhabilidade do concreto (MOURA et al., 2006).

Em seu estudo, Pereira (2019) indica que a substituição total do agregado miúdo natural por pó de mármore resultou em um concreto mais denso, durável e resistente. Nesse âmbito, apresentou um acréscimo na massa específica de 6,58%, diminuição de 5,87% na absorção de água e aumento 6,52% na resistência, certificando, assim, a viabilidade de emprego deste resíduo na produção de pisos de concreto intertravados.

Ademais, Oliveira (2007) em seu trabalho conclui que o concreto produzido com pó de mármore apresentou desempenho melhor que a areia natural em quase todos os ensaios. No que diz respeito a resistência a compressão, foram obtidas diferenças da ordem de 20%, assinalando a efetividade da utilização de mármore em argamassas para pisos cimentícios.

Alguns outros autores propõe a substituição de uma pequena fração do cimento por RBRO, isto porque a composição química cristalina dos resíduos impede o desenvolvimento de propriedades aglomerantes ou pozolânicas. Entretanto, estudos assim podem apresentar prejuízo em algumas propriedades da mistura, a exemplo de Nobrega (2015), que obteve uma diminuição no módulo de elasticidade e resistência a tração, mas ainda assim pode assegurar a

viabilidade da substituição parcial do cimento Portland para argamassas de regularização, em virtude da diminuição da absorção e do aumento de resistência a compressão.

Em sua pesquisa, Colangelo et al. (2010) verificaram o comportamento de argamassas com substituição parcial do cimento e areia por pó de mármore. Em relação ao agregado, os teores variaram entre 10%, 20% e 30%. Já em relação ao cimento, teores de 10%, 15% e 20%. Em termos de resistência à compressão, os autores concluíram que para utilização do resíduo em substituição ao agregado há melhora da propriedade em todos os teores de resíduo utilizados. Enquanto, para substituição do cimento os resultados indicaram decréscimo nas resistências, exceto para 10% que não houve mudança significativa. Com relação à trabalhabilidade, observou-se que houve melhora para todos os teores em ambas as substituições.

Al-Akhras et al. (2010) analisaram o comportamento de argamassas com utilização de resíduo do corte de rochas ornamentais após submetê-las a uma temperatura de 700 °C. As propriedades avaliadas foram trabalhabilidade, resistência à compressão e à flexão, e microestrutura das misturas, e o resíduo foi utilizado na substituição parcial do cimento e da areia em teores de 0%, 5%, 10% e 15%. Os valores de resistência à compressão e flexão mostraram crescimento com o aumento no teor de RBRO, já quanto a porosidade, o teor de 10% se mostrou o percentual de substituição ótimo. Houve também uma diminuição da trabalhabilidade pela incorporação do filler, entretanto os resultados como um todo indicaram um excelente potencial de uso.

Vardhan et al. (2015) avaliaram a trabalhabilidade, resistência à compressão e microestrutura de argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de mármore em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Com base nos resultados, os autores concluíram que a substituição só é viável até 10% do teor de cimento, pois para esse percentual houve uma melhora da trabalhabilidade e não apresentou queda na resistência à compressão. Para os teores superiores a 10%, observou-se decréscimo considerável na resistência à compressão das argamassas, possivelmente explicada pela elevação na porosidade, indicada pela análise microestrutural.

Corinaldesi et al. (2010) também desenvolveram um estudo do emprego de pó de mármore em argamassas, baseado na substituição do cimento e da areia por resíduo de mármore, sendo o percentual de substituição de 10% em relação à massa de cimento. A resistência à compressão das argamassas apresentou queda de 10% quando o resíduo foi utilizado em substituição ao agregado miúdo, e queda de 20% quando usado em substituição ao cimento.

Andrade et al. (2018) avaliaram a substituição do cimento por lama oriunda de marmoraria na produção de peças para pavimentação, os percentuais de substituição foram 10%, 20% e 30%. A adição de lama de marmoraria reduziu de maneira eficaz o índice de vazios e o teor de absorção de água. Quanto a resistência a compressão, as substituições de 10% e 20% proporcionaram um aumento considerável da propriedade, enquanto que para a substituição de 30%, a resistência mínima normatizada acabou não sendo atingida.

Araújo e Dourado (2019) em seu estudo, substituíram parte do agregado miúdo por rejeitos gerados nos desdobramentos de rochas ornamentais em proporções de 5%, 10%, 15% e 20%. Para os percentuais de 5% e 10%, a substituição não promoveu um aumento significativo dos valores de resistência à compressão. Já para os percentuais de 15% e 20%, observou-se aumentos substanciais de resistência em relação ao traço de referência, na ordem de 22% e 19%, respectivamente.

Em sua pesquisa, Cruz et al. (2020) produziu pavers com substituição parcial do cimento por resíduo de corte de mármore e granito, nos teores de 10% e 20%. Os resultados indicaram aumento da resistência a compressão de 1,05% para as amostras em que o cimento foi substituído na proporção de 10%, e uma diminuição de 0,94% para aquelas em que a substituição correspondeu a 20%. Além disso, as composições com substituição de resíduos apresentaram menor percentual de absorção de água e menor índices de vazios, quando comparadas à mistura sem adição de resíduo.

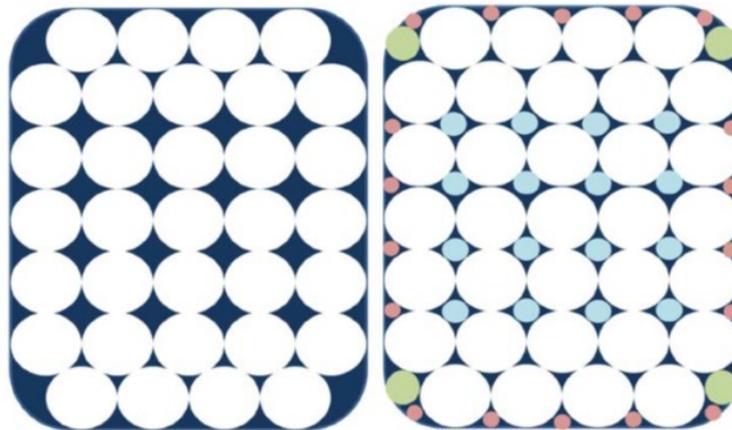
O reaproveitamento do RBRO que seria descartado, além de contribuir para o meio ambiente, permite também uma redução no custo total do concreto, seja na substituição dos agregados, ou na substituição parcial do próprio cimento.

4 EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS

O interesse em estudar o empacotamento de partículas tem aumentado cada vez mais nos últimos anos, interesse este que tem se manifestado em diferentes áreas da engenharia. Isto pode ser explicado pelo fato da grande maioria dos materiais naturais ou industriais utilizados diariamente na construção apresentarem partículas de diferentes tamanhos e formas (CASTRO e FERREIRA, 2016).

Dito isto, Oliveira (2013) definem o estudo de empacotamento das partículas como um problema de correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de maneira que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios deixados por estas, serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente. Isto traz como resultado uma maior densificação na matriz do concreto pela redução do volume de vazios entre os grãos (diminui não só o tamanho dos poros, mas também a conectividade entre eles). A Figura 6 ilustra a otimização de uma mistura de concreto por meio da técnica de empacotamento de partículas.

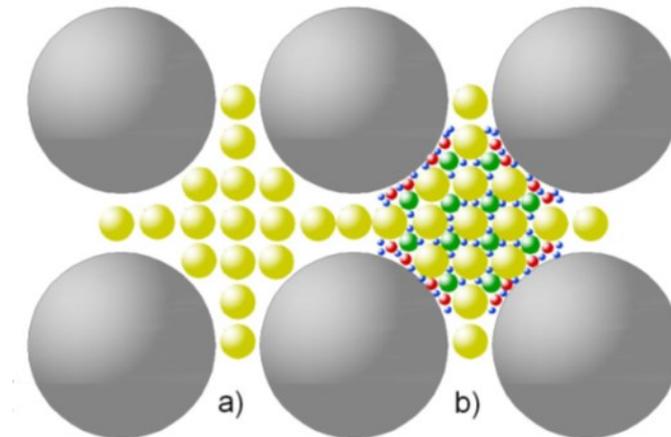
Figura 6 - Otimização de uma mistura pelo empacotamento de partículas.



Fonte: CAMPOS et al. (2016).

A distribuição de tamanho de partículas influencia na densidade de empacotamento do agregado que, por sua vez, determinará o volume de vazios a serem preenchidos pela pasta. Damireli (2013) destaca que utilizar uma distribuição polimodal de granulometria (inserção de maior quantidade de granulometrias em uma mistura) permite uma otimização do processo de empacotamento, se comparado com uma distribuição bimodal, por exemplo. A Figura 7 ilustra a diferença entre esses tipos de distribuição.

Figura 7 - a) distribuição bimodal; b) distribuição polimodal.



Fonte: DAMINELI (2013).

Ao aprimorar o empacotamento, tem-se uma redução do volume de pasta necessário para preencher os vazios, permitindo maior quantidade de pasta para envolver as partículas de agregado e sendo assim, uma melhor trabalhabilidade. Outra consequência do empacotamento é a diminuição da relação água/cimento (a/c), que pode levar ao aumento da resistência e da durabilidade do concreto (KWAN et al., 2014).

Em síntese, a densidade de empacotamento de todo o sistema de partículas é um parâmetro fundamental que rege o desempenho do concreto. Desde então, por meio de estudos teóricos e experimentais têm sido propostos modelos de empacotamento como ferramentas para calcular a densidade de empacotamento das partículas e, assim, otimizar misturas granulares de concretos (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

4.1 MODELOS DE EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS

A seguir são apresentados os modelos de empacotamento de partículas baseados na distribuição granulométrica de Andreassen (1930), Furnas (1931) e Andreassen Modificado (1992), que são alguns dos modelos mais difundidos no meio acadêmico.

4.1.1 Modelo de Andreassen

O modelo de Andreassen (1930) aborda a distribuição de materiais particulados como contínua, uma vez que todos os diâmetros podem ser encontrados em distribuições reais de partículas. Para este modelo, o empacotamento ideal de partículas possui condições de similaridade em torno de duas partículas com dimensões bastante diferentes, e essa condição

de similaridade define a distribuição de tamanho de partículas em termos de uma lei de potências, dada pela Equação 1 (OLIVEIRA et al., 2000):

$$CPFT = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q (\%) \quad (1)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D;

D_L é o diâmetro da maior partícula;

q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Neste modelo, o coeficiente “q” deve estar compreendido entre 0,33 e 0,50; para propiciar, em teoria, o máximo empacotamento possível. Entretanto, isso só ocorre quando o diâmetro da menor partícula do empacotamento é zero, o que não ocorre na prática. Sendo assim, deve-se utilizar o menor diâmetro possível para maximizar o empacotamento em condições reais (OLIVEIRA et al., 2000).

Andreassen (1930) tem seu modelo considerado simples de se aplicar, no entanto, sua natureza semi-empírica, aliada a necessidade das partículas apresentarem formas similares (pois não requer nenhum fator de forma), bem como o fato de admitir partículas infinitamente pequenas; fizeram com que alguns pesquisadores manifestassem resistência a este modelo (VANDERLEI, 2004).

4.1.2 Modelo de Furnas

No modelo de Furnas (1931) a distribuição de partículas é tratada como discreta e considera as partículas individualmente. Furnas demonstrou que a distribuição de máxima densidade de empacotamento de vários tamanhos de partículas forma uma progressão geométrica, e generalizou sua teoria para qualquer mistura na Equação 2 (OLIVEIRA, 2013):

$$CPFT = 100 \left(\frac{D^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) (\%) \quad (2)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D;

D_L é o diâmetro da maior partícula;

D_S é o diâmetro da menor partícula;

r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

Por muitos anos o modelo de Furnas (1931) foi o mais defendido pelos pesquisadores, apesar de ser complicado e incômodo de se utilizar, uma vez que requer um fator de forma das partículas (VANDERLEI, 2004).

4.1.3 Modelo de Andreassen Modificado

A fim de superar os problemas dos modelos anteriores, Funk e Dinger realizaram em 1992 uma série de estudos em ambos modelos de empacotamento, demonstrando que Furnas e Andreassen convergiam para uma única equação (Equação 3), e este novo modelo foi chamado de Modelo de Andreassen Modificado (também conhecido como Modelo de "Alfred") (FUNK e DINGER, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) (\%) \quad (3)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D ;

D_L é o diâmetro da maior partícula;

D_S é o diâmetro da menor partícula;

q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

O Modelo de Andreassen Modificado é considerado um aperfeiçoamento dos modelos anteriores e mostra que, na realidade, os modelos de Furnas e de Andreassen podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa (FUNK e DINGER, 2013). Além de introduzir o conceito do tamanho mínimo de partículas (D_S) na equação de Andreassen, envolve também uma revisão matemática do modelo de Furnas (OLIVEIRA et al., 2000).

Por meio de simulações computacionais Dinger e Funk verificaram em 1993 que valores de “ q ” menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto que para valores acima de 0,37, nota-se sempre uma porosidade residual. De forma que para a mistura apresentar boa capacidade de escoamento, o valor do coeficiente de distribuição deve ser menor que 0,30. O coeficiente de distribuição “ q ” é reduzido à medida que se aumenta a quantidade de finos (VANDERLEI, 2004).

Existem diferenças consideráveis entre os modelos apresentados anteriormente. Por meio de comparações das densidades obtidas experimentalmente a partir de cada um dos modelos, concluiu-se que o modelo de Andreassen Modificado obtém melhores resultados e maior eficiência no empacotamento de partículas, quando comparado com os modelos de Furnas e Andreassen (OLIVEIRA, 2013).

4.2 EFEITO FILLER

Os fillers podem ser definidos como materiais finamente moídos (provenientes da britagem de agregados miúdos e/ou graúdos), de diâmetro médio próximo ao do cimento, e que quando adicionados em pequenas quantidades à mistura, como material de enchimento, possuem características físicas capazes de melhorar algumas propriedades de argamassas e concretos através de uma melhor distribuição granulométrica das partículas e empacotamento dos grãos (SOARES, 2010).

Poggiali (2010) indica que a diminuição de vazios internos nas argamassas e concretos, pela adição de finos, proporciona menores capilares e um conseqüente menor fluxo capilar da água no interior da mistura. Deste modo, tem-se uma diminuição do coeficiente de absorção de água, propiciando uma maior impermeabilidade da mistura, o que dificulta a percolação de agentes agressivos em seu interior e, por conseguinte, aumenta a durabilidade do concreto. Bardini (2008) aponta que os fillers além de aumentar a durabilidade, asseguram a melhora do comportamento reológico (comportamento do material após a inserção do fluido) e das propriedades físicas e mecânicas de misturas cimentícias.

Destaca-se que as alterações reológicas ocasionadas pela adição de filler não estão associadas só à finura e composição granulométrica, envolvem outros fatores como a forma e a textura das partículas (NEHDI et al., 1998). De forma que, partículas de formatos pouco esféricos dificultam o empacotamento e a reologia, isto ocorre uma vez que fillers com formato de grãos mais alongados criam sistemas com baixa fluidez e alta viscosidade; o que pode ser explicado pelo fato dos grãos colidirem em diversos ângulos durante as movimentações internas e apresentarem maior dificuldade de acomodação, sendo assim demandam grande quantidade de água e dispersante (SEQUEIRA, 2020).

Com relação a influência química, Marangon (2006) aponta que os fillers agem acelerando o processo de hidratação dos minerais do clínquer, o que tem por conseqüência aumento de resistência mecânica das misturas nas primeiras idades. No que se refere ao efeito físico do filler, além de melhorar o empacotamento dos grãos, esse tipo de material proporciona

o efeito de nucleação, sendo esse, outro fator que melhora as propriedades mecânicas e durabilidade do material (WOLF, 2010).

De acordo com PANESAR e AQEL (2020), o efeito de nucleação ocorre quando o material adicionado promove sítios para a precipitação de produtos de hidratação, acelerando as reações de hidratação do cimento e melhorando o grau das mesmas. Em decorrência da precipitação de C-S-H na superfície das partículas do material, a hidratação de produtos cimentícios tende a cobrir a superfície das partículas com esse mesmo C-S-H.

Nesse âmbito, o efeito de nucleação depende, não só da estrutura superficial e composição química das partículas, mas principalmente do tamanho e da quantidade de partículas das adições minerais: quanto menor o tamanho da partícula, melhor o mecanismo de nucleação e quanto maior quantidade de aditivos minerais, maior a probabilidade de se formarem os sítios de nucleação próximos à partícula do cimento (LAWRENCE et al., 2003).

Em virtude desse favorecimento na hidratação do cimento, Bardini (2008) assinala que a adição de filler tende a reduzir a exsudação e a segregação das misturas; e em alguns casos, eles são capazes de aumentar a plasticidade e a trabalhabilidade sem elevar o consumo de água da mistura. Além disso, os fillers podem promover um incremento na resistência à compressão do material, melhorar a resistência à fissuração térmica (calor de hidratação), e também a resistência à ação do congelamento.

Por outro lado, alguns fillers podem ocasionar o aumento do teor de água no concreto, o que afeta de forma negativa a resistência ao intemperismo e a proteção às armaduras. Apesar desta adversidade quanto ao emprego destes materiais, seu uso vem crescendo no Brasil nos últimos anos, sendo inclusive, uma importante ferramenta para reutilização de resíduos. E a medida que as pesquisas avançam, as condições desfavoráveis vêm sendo contornadas por meio de estudos de traço, incorporação de aditivos e melhores técnicas nos canteiros de obras (CAMPOS et al., 2018).

Corinaldesi et al. (2010) reiteram que o pó de mármore se mostra muito eficaz como filler, uma vez que garante uma boa coesão de argamassa e concreto, devido à sua alta finura, e, ainda, seus efeitos são mais positivos e evidentes em idades precoces, em virtude de à sua capacidade de preenchimento. Tennich et al. (2015) salientaram que apesar da substituição de filler calcário pelo filler de mármore em concreto auto adensável provocar uma redução da fluidez da mistura, a mesma permitiu um aumento na resistência à compressão em cerca de 6,7%.

Elyamany et al. (2014) abordam em sua pesquisa o uso de fillers pozolânicos (sílica ativa e metacaulim) e não pozolânicos (pó de calcário, pó de granito e pó de mármore) e como

isto afeta a absorção de água, resistência a segregação, exsudação e à compressão de concretos auto adensáveis. Os fillers não-pozolânicos, apresentaram melhor resistência à exsudação, e produziram concretos com menor absorção de água e menor razão de vazios em comparação com os fillers pozolânicos. Em termos de resistência à segregação, o concreto com filler de pó de mármore se mostrou o melhor em relação a todos outros tipos de fillers. Além disso, os fillers não-pozolânicos não tiveram efeito negativo significativo na resistência à compressão do concreto.

É recorrente a elaboração de pesquisas que envolvem a avaliação de alterações em propriedades mecânicas de argamassas e concretos causadas pela substituição de ligantes por filler, a exemplo de Aqel e Panesar, (2016), Lange et al. (1997), Palm et al. (2016), Tsivilis et al., (2002), dentre outras. Apesar deste tipo de abordagem estar mais próxima de uma aplicação real, ela não permite a realização de uma análise direta de como a pasta de cimento (matriz) é afetada por outras variáveis, variáveis estas que acabam não sendo consideradas pela impossibilidade de serem completamente isoladas, à exemplo dos efeitos do agregado e sua interface com a matriz (CECEL, 2019).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram estudadas misturas de concreto com diferentes percentuais (em massa) de pó de mármore substituindo a areia natural, com o objetivo de verificar o comportamento do material como filler e sua influência nas propriedades do concreto. Esse capítulo, traz a descrição de cada um dos materiais utilizados, bem como o detalhamento dos métodos utilizados para execução dos experimentos deste trabalho.

A metodologia proposta pode ser sintetizada da seguinte maneira:

- a) coleta, transporte e armazenamento dos materiais a serem utilizados no programa experimental;
- b) caracterização física dos agregados: Massa específica, Massa unitária, Granulometria, Absorção de água (agregados graúdos) e Teor de material fino;
- c) estudo para o desenvolvimento das dosagens;
- d) produção do concreto, moldagem dos corpos de prova, seguida pela cura dos mesmos;
- e) realização dos ensaios de consistência, massa específica no estado endurecido, velocidade de pulso ultrassônico, teor de absorção, resistência a compressão, módulo estático de elasticidade e ensaio de microscopia);
- f) análise comparativa dos resultados encontrados para os diferentes traços.

5.1 MATERIAIS

Uma vez que o conhecimento das propriedades de cada material isolado se mostra importante para as propriedades do material composto, no caso o concreto, faz-se necessário um programa de ensaios para a caracterização de cada um.

5.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento do tipo Portland de alto-forno resistente à sulfatos, CP III – 40 – RS (conforme apresentado na Figura 8), com resistência à compressão mínima de 40 MPa (aos 28 dias), fabricado na cidade de Volta Redonda/RJ, pela Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Optou-se por um cimento CP III tendo em vista que esse é o tipo de cimento com maior utilização no município de Juiz de Fora/MG.

Figura 8 - Cimento utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A fim de caracterizar o produto empregado, são apresentadas a seguir a análise física e química fornecidas pelo fabricante:

a) análise física:

- finura (superfície específica) (NBR 16372:2015) = 4.659 cm²/g;
- finura (resíduo na peneira #400) = 1,9%;
- tempo de Início de Pega (NBR NM 65/2003): 198 minutos;
- expansibilidade a quente (NBR 11582:2016) = 0 mm;
- solubilidade em água 1,5g/l;
- resistência à compressão para as seguintes idades (NBR 7215/2019):
 - 1 Dia = 13,0 MPa;
 - 3 Dias = 25,9 MPa;
 - 7 Dias = 35,8 MPa;
 - 28 Dias = 47,7 MPa.

b) análise química:

- resíduo insolúvel = 0,97%;
- pH = 13;
- perda ao fogo = 2,57%;
- óxido de alumínio, Al₂O₃ = 7,50%;

- dióxido de silício, $\text{SiO}_2 = 25,79\%$;
- óxido de ferro, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,95\%$;
- óxido de cálcio, $\text{CaO} = 54,53\%$;
- óxido de magnésio, $\text{MgO} = 3,43 \%$;
- óxido sulfúrico, $\text{SO}_3 = 1,67\%$;
- dióxido de carbono, $\text{CO}_2 = 0\%$;
- óxido de potássio, $\text{K}_2\text{O} = 0,69\%$.

5.1.2 Agregados

Os agregados utilizados foram: areia natural oriunda do Rio Preto/MG; pó de mármore #40 (passante na peneira de 0,42 mm), proveniente do beneficiamento de rochas calcárias, fornecido por uma empresa unifamiliar de Mar de Espanha/MG; areia artificial, brita 0 e brita 1 obtidas junto à Pedreira Pedra Sul (Juiz de Fora/MG), na Figura 9 os materiais são apresentados.

Figura 9 - Agregados utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A obtenção de dados se faz necessária para o estabelecimento de padrões comparativos entre os agregados e para o próprio controle da produção dos concretos, sendo assim foram executados os ensaios de massa específica, massa unitária, teor de finos, granulometria

(determinando-se a dimensão máxima característica do agregado, módulo de finura, e classificação do agregado) e teor de absorção de água (apenas agregados graúdos).

Para os procedimentos de caracterização, foram realizadas três repetições de uma amostra de material e a partir dos resultados encontrados, determinou-se a média dos mesmos, que foi adotada como valor real, em resumo, as análises e considerações foram baseadas nos valores médios.

5.1.2.1 Massa Específica

A compreensão da massa específica, massa unitária e absorção de um agregado são extremamente importantes e muito utilizada na prática. Segundo Metha e Monteiro (2014), a massa específica está diretamente relacionada com a porosidade do agregado, podendo ser definida como a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água.

A massa específica é utilizada para cálculos de quantidades, e não como um indicativo de qualidade. Para efeitos de dosagem, é necessário que se conheça o espaço ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros dentro das partículas e excluindo os vazios entre elas, uma vez que volume de concreto produzido é afetado pela massa específica do agregado utilizado (NEVILLE, 2016).

A massa específica dos agregados miúdos foi designada segundo a metodologia preconizada pela NBR NM 52 da ABNT (2009) – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Já para os agregados graúdos, seguiu-se a NBR NM 53 da ABNT (2009) – Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica dos agregados.

MASSA ESPECÍFICA (NM 52/2009) (g/cm³)	
Areia Natural	2,597
Areia Artificial	2,725
Pó de Mármore	2,849
MASSA ESPECÍFICA (NM 53/2009) (g/cm³)	
Brita 0	2,789
Brita 1	2,797

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.1.2.2 Massa Unitária

A expressão massa unitária é usada quando o volume é ocupado tanto pelos agregados como pelos espaços vazios, visto que não é possível compactar as partículas de modo a remover todos os vazios entre elas (METHA e MONTEIRO, 2014). A análise da massa unitária do agregado é importante, dado que é levada em consideração no cálculo de dosagem do concreto e serve como parâmetro para transformar massa em volume ou vice-versa (NEVILLE, 2016).

Foi definida a massa unitária da areia natural, artificial, pó de mármore e das britas 0 e 1, conforme a NBR NM 45 da ABNT (2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Segue na Tabela 3, os valores obtidos.

Tabela 3 - Massa unitária dos agregados.

MASSA UNITÁRIA (NM 45/2006) (g/cm³)	
Areia Natural	1,526
Areia Artificial	1,777
Pó de Mármore	1,683
Brita 0	1,428
Brita 1	1,522

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.1.2.3 Teor de Finos

Materiais finos, também conhecidos como materiais pulverulentos, são definidos como partículas minerais com dimensão inferior a 0,075mm, e que podem estar presentes nos agregados na forma de uma película superficial. O conhecimento da quantidade de material pulverulento dos agregados é de extrema importância, pois o excesso desse material prejudica a aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Além disso, eles aumentam o consumo de água para uma mesma consistência (devido a maior superfície de contato), prejudicando de forma direta a resistência mecânica, a trabalhabilidade e a durabilidade do concreto (NEVILLE, 2016).

Os ensaios para estipular o teor de material fino dos agregados foram realizados de acordo com NBR NM 46 da ABNT (2003) – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Os resultados são explicitados na Tabela 4.

Tabela 4 - Teor de finos dos agregados.

TEOR DE FINOS (NM 46/2003)	
Areia Natural	1,92%
Areia Artificial	20,02%
Pó de Mármore	14,46%
Brita 0	0,25%
Brita 1	0,30%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para agregados empregados em concretos submetidos ao desgaste superficial (como o caso dos blocos para pavimentação) o teor de finos não deve ser superior à 3%, segundo preconizado pela NBR 7211 da ABNT (2009). Porém, essa mesma norma estabelece que quando o material fino passante pela peneira de 75 μm for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem de rocha (pó de mármore e areia artificial), os limites fixados pela norma podem ser alterados, desde que os grãos constituintes não prejudiquem as propriedades do concreto.

5.1.2.4 Composição Granulométrica

Composição granulométrica é a denominação dada à simples operação de classificar uma amostra de agregado em frações, que apesar de cada uma delas ser constituída por partículas de mesma dimensão, na prática, cada fração contém partículas entre limites específicos - as aberturas de peneiras de ensaio padronizadas. A granulometria é um aspecto importante do agregado, isso se deve a sua grande influência na qualidade das argamassas e concretos, especialmente na compacidade, trabalhabilidade e resistência a esforços mecânicos (METHA e MOMTEIRO, 2014)

A granulometria foi estabelecida segundo o que é preconizado pela NBR NM 248 da ABNT (2003) – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Por meio deste ensaio, foi possível deduzir a tabela granulométrica de cada material, bem como outros dois parâmetros, tais quais: a dimensão máxima característica e o módulo de finura.

A NBR 7211 (2009) define dimensão máxima característica como a “grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa”. Enquanto que o conceito dado ao módulo de finura é “a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”.

Tendo em vista que os resultados de uma análise granulométrica podem ser mais facilmente compreendidos quando representados graficamente, traçou-se a curva granulométrica representativa de cada agregado a partir dos valores percentuais correspondentes ao “Retido Acumulado”. Essas curvas foram comparadas com os limites inferiores e superiores estabelecidos pela NBR 7211 da ABNT (2009), a fim de realizar a classificação dos materiais.

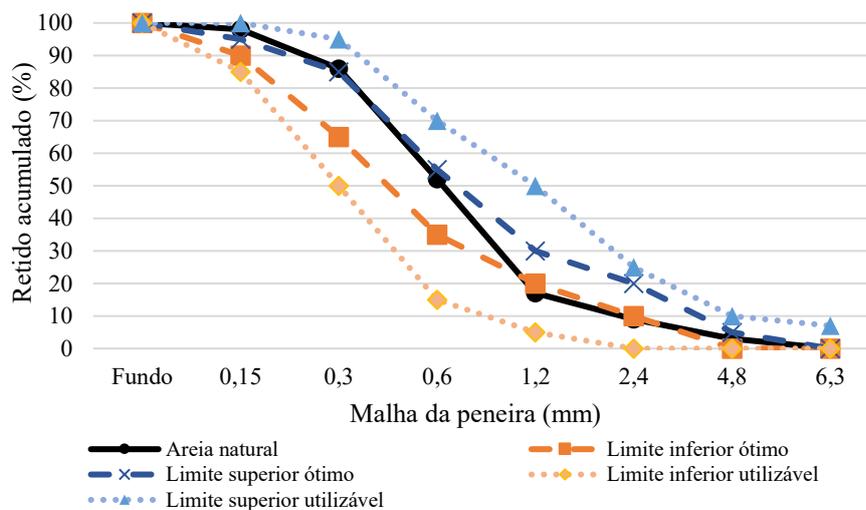
Os valores encontrados no ensaio para areia natural são indicados na Tabela 5 e no Gráfico 2.

Tabela 5 - Granulometria areia natural.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NM 248/2003)		
Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
4,80	2,88	3
2,36	5,74	9
1,18	8,74	17
0,60	34,26	52
0,30	34,03	86
0,15	12,28	98
Fundo	2,06	100
Módulo de finura		2,64
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para o caso da areia natural, os percentuais concentram-se dentro da chamada zona utilizável e, portanto, o material deve ser assim classificado.

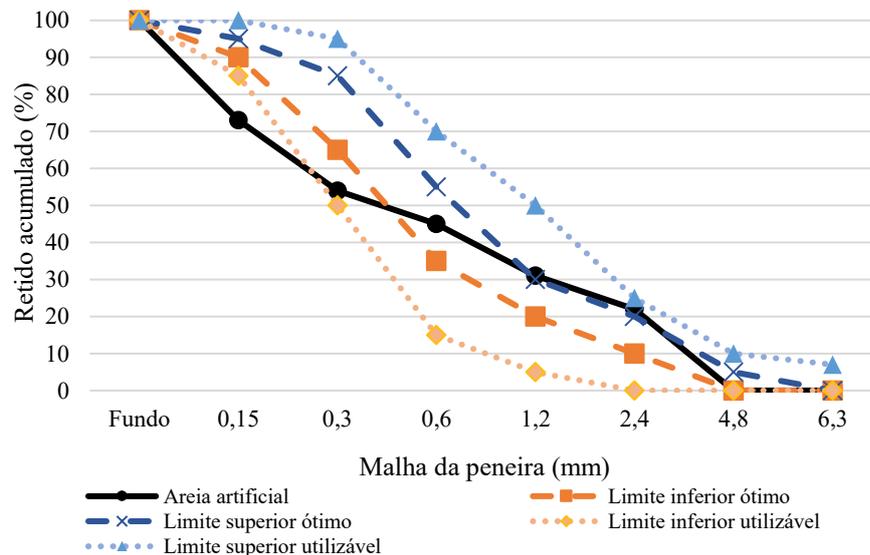
Os resultados e as respectivas considerações sobre os demais materiais utilizados como agregados neste trabalho serão apresentados a seguir. Resultados para areia artificial, indicados na Tabela 6 e no Gráfico 3.

Tabela 6 - Granulometria areia artificial.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NM 248/2003)		
Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
4,80	0,00	0
2,36	21,96	22
1,18	8,98	31
0,60	13,98	45
0,30	9,57	54
0,15	18,73	73
Fundo	26,78	100
Módulo de finura		2,26
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 3 - Curva granulométrica da areia artificial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A mesma análise realizada anteriormente foi feita a respeito da zona de classificação da areia artificial. Posto isto, pode-se afirmar que esse material se concentra majoritariamente dentro da chamada zona utilizável, e assim é classificado.

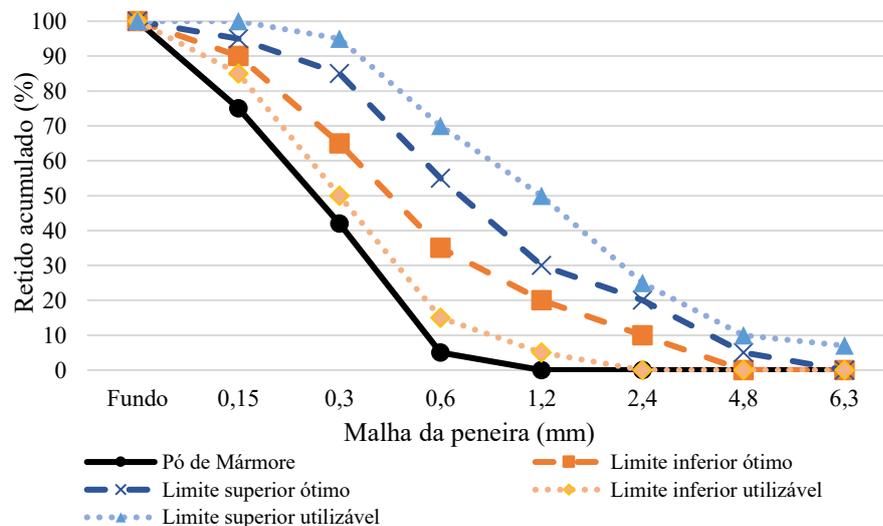
Para o pó de mármore, são apontados na Tabela 7 e no Gráfico 4 os valores encontrados.

Tabela 7 - Granulometria pó de mármore.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NM 248/2003)		
Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
4,80	0,00	0
2,36	0,00	0
1,18	0,00	0
0,60	5,16	5
0,30	36,60	42
0,15	33,70	75
Fundo	24,54	100
Módulo de finura		1,22
Dimensão Máxima Característica (mm)		0,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 4 - Curva granulométrica do pó de mármore.

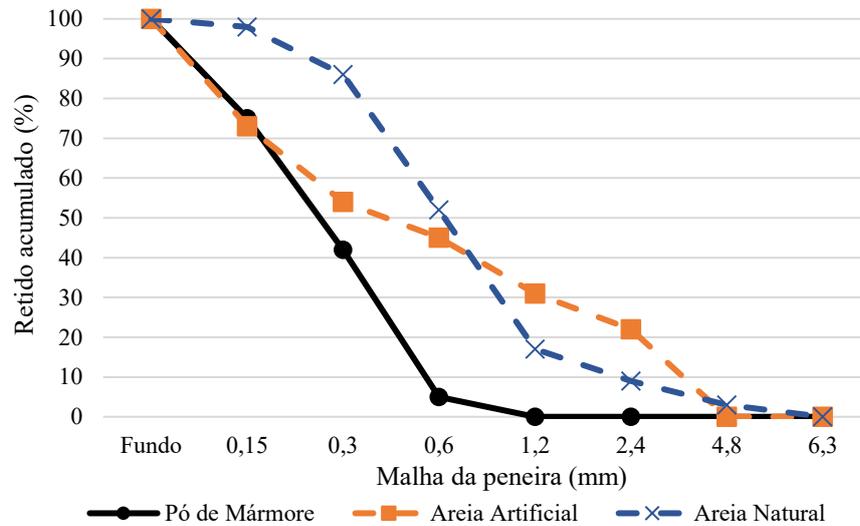


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Constatou-se que o pó de mármore se encontra fora dos limites da zona utilizável (abaixo do limite da zona utilizável inferior, isto é, o material apresenta um maior teor de finos que o recomendado por norma). Sendo assim, é preciso realizar estudos para assegurar o emprego do mesmo, verificando se ele é viável ou não para determinada finalidade – metodologia adotada nesta pesquisa.

Para melhor visualização da dimensão dos agregados miúdos, segue no Gráfico 5 um comparativo das curvas granulométricas da areia natural, areia artificial e pó de mármore.

Gráfico 5 - Comparativo das curvas granulométricas dos agregados miúdos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

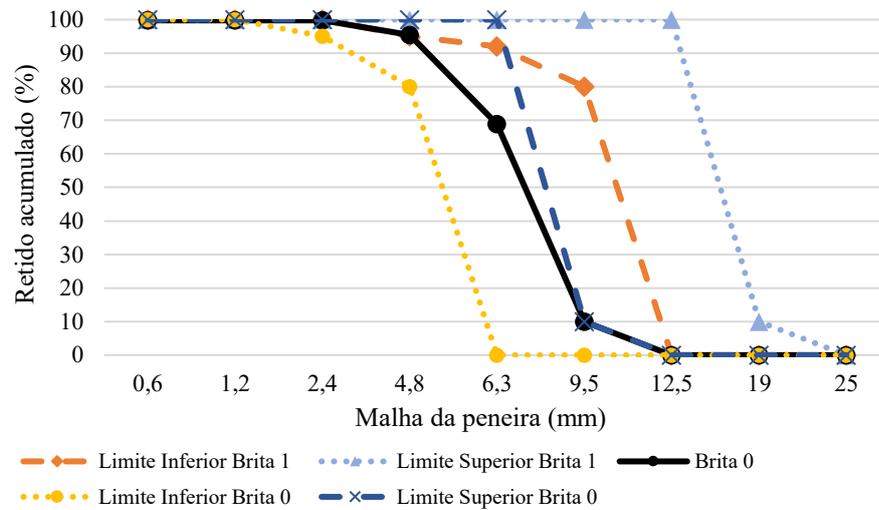
Para a brita 0 os resultados dos ensaios são encontrados na Tabela 8 e Gráfico 6; enquanto que os resultados para a brita 1 são apontados na Tabela 9 e Gráfico 7.

Tabela 8 - Granulometria da brita 0.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NM 248/2003)		
Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
19,00	0,00	0
12,50	0,00	0
9,50	9,96	10
6,30	58,97	69
4,80	26,51	95
2,36	4,33	100
1,18	0,00	100
0,60	0,00	100
0,30	0,00	100
0,15	0,00	100
Fundo	0,23	100
Módulo de finura		6,04
Dimensão Máxima Característica (mm)		12,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 6 - Curva granulométrica da brita 0.



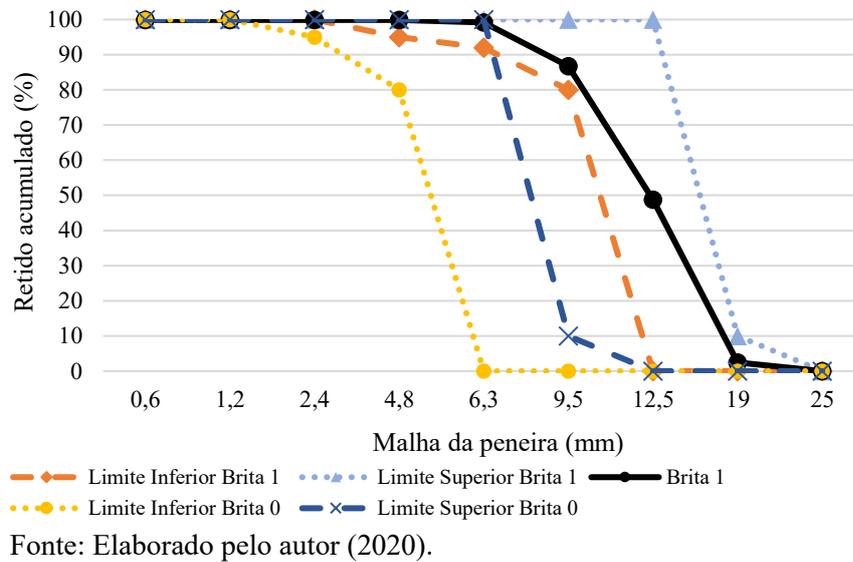
Tendo em vista que o material analisado se encontra totalmente entre os limites determinados pela norma NBR 7211 da ABNT (2009), pode-se classificá-lo como brita 0.

Tabela 9 - Granulometria brita 1.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NM 248/2003)		
Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
19,00	2,48	2
12,50	46,30	49
9,50	37,98	87
6,30	12,41	99
4,80	0,71	100
2,36	0,00	100
1,18	0,00	100
0,60	0,00	100
0,30	0,00	100
0,15	0,00	100
Fundo	0,12	100
Módulo de finura		6,89
Dimensão Máxima Característica (mm)		19,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

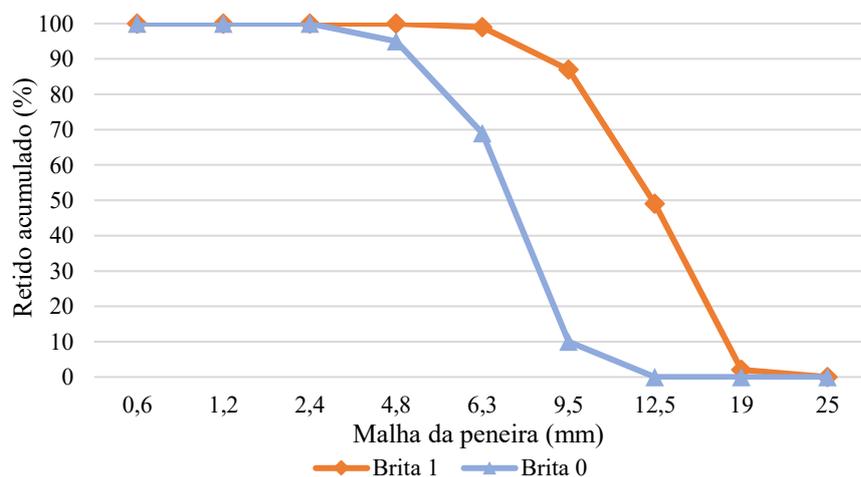
Gráfico 7 - Curva granulométrica da brita 1.



O material analisado encontra-se completamente entre os limites determinados pela norma NBR 7211 da ABNT (2009), sendo classificado então como brita 1.

No Gráfico 8 é apresentado um comparativo das curvas granulométricas da brita 0 e brita 1.

Gráfico 8 - Comparativo das curvas granulométricas dos agregados graúdos.



5.1.2.5 Teor de Absorção

De acordo com Metha e Monteiro (2014), a absorção nada mais é que o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, sendo que a absorção de água do agregado graúdo possui grande importância no que diz respeito a dosagem

do concreto. Por isso, compreender essa característica é fundamental para o entendimento de outras características como massa específica e massa unitária, pois se o agregado utilizado nos ensaios estiver úmido, os valores obtidos serão diferentes dos obtidos com o agregado previamente seco, o que acarretaria em erros de dosagem do concreto.

Além disso, a absorção de água geralmente está relacionada com a porosidade e permeabilidade, que por consequência pode influenciar na resistência, durabilidade, aderência entre agregado e pasta de cimento, na resistência à abrasão do concreto, bem como na sua estabilidade química (NEVILLE, 2016).

Assim como a massa específica, o teor de absorção de água das britas também foi estabelecido de acordo com a NBR NM 53 da ABNT (2009) – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10, a seguir:

Tabela 10 - Teor de absorção de água.

ABSORÇÃO DE ÁGUA (NM 53/2009)	
Brita 0	0,95%
Brita 1	0,46%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.1.3 Aditivo

A fim de conferir uma maior trabalhabilidade do concreto, foi utilizado um aditivo plastificante de pega normal, especificamente, o aditivo incorporado à mistura será o SikaMent RM-300, cujas especificações são:

- a) atende os requisitos da NBR ABNT 11.768;
- b) base química: combinação de dispersantes orgânicos em base aquosa;
- c) dosagem recomendada: 0,30% a 1,60% sobre o peso de aglomerantes;
- d) densidade: 1,18 +/- 0,02 g/cm³;
- e) valor de pH: 6,0 +/- 1,0;
- f) aspecto/cor: líquido/marrom.

A escolha desse aditivo se deu pelo fato de não apresentar nenhum problema de compatibilidade com os materiais a serem utilizados no trabalho, o que foi comprovado por pesquisas anteriores que lançaram mão desse aditivo e dos mesmos materiais.

5.1.4 Água

A água utilizada tanto na produção quanto no processo de cura dos corpos de prova, é proveniente da rede pública de abastecimento, administrada pela Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora/MG – CESAMA.

5.2 MÉTODOS

Segue a metodologia adotada na dosagem, produção e moldagem dos concretos, bem como a metodologia de ensaios.

5.2.1 Dosagem

Traço, expresso em massa, pode ser definido como a indicação da proporção que os materiais devem ser misturados, em relação à quantidade de cimento, para produção do concreto, de acordo com as devidas especificações de resistência. A NBR 9781 da ABNT (2013) estabelece que a resistência característica à compressão das peças de concreto para pavimentação varia de acordo tipo de veículo que trafega sobre a via. Quando o trânsito é de pedestres, veículos leves e comerciais de linha, a exigência é que a resistência após 28 dias seja maior ou igual a 35 MPa, sendo esse o valor adotado como referência para as dosagens do concreto nesta pesquisa.

As proporções desses materiais são definidas por meio de experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, nos quais devem ser considerados os tipos de insumos disponíveis no local de produção.

Em sua pesquisa, Pereira (2019) utilizou-se dos mesmos materiais a serem empregados neste estudo e lançou mão de um traço comumente adotado na fabricação de blocos de concreto, sendo este 1: 1,934: 0,644: 0,914: 2,133 (cimento: areia natural: areia artificial: brita 0: brita 1), com relação água/cimento de 0,52; e a resistência média obtida foi de 36,78MPa.

Tendo em vista os bons resultados obtidos por Pereira (2019), aliado ao fato dos materiais serem os mesmos, optou-se em manter o traço de referência. Além disso, foram estabelecidas duas variações, denominadas traços experimentais.

Os traços experimentais 1 e 2 (T₁₅ e T₂₅) consistem em alterações do chamado traço de referência, através da adição do resíduo de mármore em substituição da areia natural, nas

proporções de 15% e 25%, respectivamente. Os traços de dosagem são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Traços em massa dos concretos produzidos.

Materiais	Traço de Referência (T₀)	Traço Experimental 01 (T₁₅)	Traço Experimental 02 (T₂₅)
Cimento	1,000	1,000	1,000
Areia Natural	1,934	1,644	1,450
Areia Artificial	0,644	0,644	0,644
Pó de Mármore	0,000	0,290	0,484
Brita 0	0,914	0,914	0,914
Brita 1	2,133	2,133	2,133
Relação Água/Cimento	0,52	0,52	0,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Além disso, para todos os traços foi estabelecida a incorporação de 0,65% de aditivo plastificante, com o objetivo de tornar o processo de moldagem das peças mais eficiente.

Para a escolha da porcentagem de substituição, comparou-se os percentuais passantes nas peneiras para cada substituição (de 0% até 100%) com os percentuais calculados de acordo com o modelo de Andreassen Modificado, sendo adotado os seguintes valores para a realização dos cálculos: $q = 0,37$; $D_s = 0,075\text{mm}$; e $D_L = 19\text{mm}$. São apresentados no Apêndice A os passantes em cada peneira para todos os percentuais (de 0% a 100%) variando de 5 em 5%.

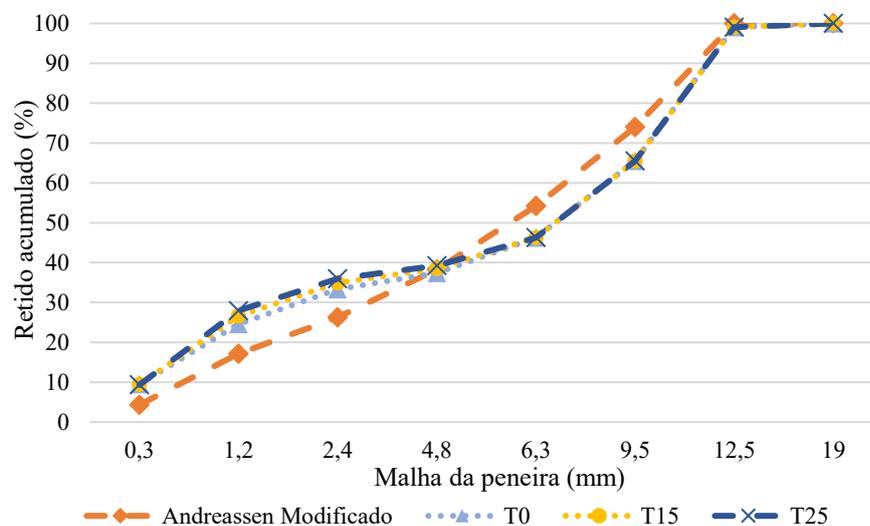
Optou-se pela substituição de 15% e 25%, ao passo que estes percentuais permitiriam a observação do efeito filler sem que houvesse um aumento considerável do percentual passante nas peneiras 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm e 2,4 mm. Pois, um aumento considerável do passante nessa faixa poderia prejudicar o empacotamento dos grãos, já que para substituições com maiores percentuais de pó de mármore as curvas se afastariam cada vez mais da curva de Andreassen modificado, conforme observado na Tabela 12 e no Gráfico 9.

Tabela 12 - Passante percentual estimado em cada peneira (%).

Peneira	Empacotamento Ótimo Andreassen Modificado	Sem substituição	Substituição de 15%	Substituição de 25%
25	100	100,000	100	100
19	100	99,059	99,0592	99,0592
9,5	74,0275	65,477	65,4769	65,4769
4,8	54,1972	46,276	46,2765	46,2765
2,4	38,255	37,365	38,4973	39,2523
1,2	26,2503	33,279	34,8743	35,9377
0,6	17,1594	24,552	26,6015	27,968
0,3	9,92684	17,367	18,0231	18,4604
0,15	4,33042	9,522	9,40606	9,3289

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 9 - Curva comparativa dos percentuais passantes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Cabe ressaltar, que esse trabalho não propõe que seja realizada a separação dos agregados em faixas granulométricas, pois tornaria o processo de eventual produção industrial inviável técnica e economicamente, uma vez que os materiais não são comercializados separadamente por faixa granulométrica.

5.2.2 *Produção do Concreto*

Após a definição do traço, algumas medidas foram tomadas antes da produção do concreto propriamente dita:

- a) inicialmente, os materiais foram pesados, separados e devidamente identificados (Figura 10);
- b) logo depois, passou-se desmoldante nas formas (Figura 11);
- c) todas as ferramentas utilizadas no processo (colheres de pedreiro, conchas metálicas, pá, carrinho de mão e betoneira) foram umedecidas para que não houvesse perda da água do traço;
- d) os agregados miúdos foram colocados na condição saturada com superfície seca (Figura 12), procedimento realizado com o auxílio de uma enxada (a água utilizada nesse processo deve ser descontada da quantia total que seria incorporada à mistura);
- e) os agregados graúdos também foram colocados na condição saturada com superfície seca (Figura 13), sendo nesse caso o procedimento realizado diretamente na betoneira (a água utilizada nesse processo deve ser descontada da quantia total que seria incorporada à mistura).

Figura 10 - Materiais pesados e devidamente separados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 11 - Formas com desmoldante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 12 - Agregado miúdo em condição saturada com superfície seca.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 13 - Agregado graúdo em condição saturada com superfície seca.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Realizadas essas premissas, os materiais foram adicionados na betoneira (Figura 14), na seguinte ordem: agregados graúdos, cimento, cerca de 80% da água, agregados miúdos, aditivo e o restante da água, sempre os misturando em intervalos, à medida que eram acrescentados. Segue na Figura 15 a mistura pronta.

Figura 14 - Materiais sendo adicionados a betoneira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 15 - Mistura pronta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.3 *Determinação da Consistência*

Segundo Neville (2016), um concreto que pode ser facilmente adensado é considerado um concreto trabalhável, entretanto a trabalhabilidade deve ser definida como uma propriedade física do concreto em si, sem referência às situações de um tipo de construção específico.

Mehta e Monteiro (2014) salientam a relevância da trabalhabilidade em tecnologia do concreto na medida que uma mistura de concreto que não possa ser facilmente lançada ou bem adensada, certamente não fornecerá a resistência e a durabilidade esperada por ela. Entretanto, em virtude à sua natureza composta, não existe um método aceito que avalie diretamente a trabalhabilidade do concreto. Sendo assim, determina-se a consistência, que pode ser definida como a firmeza da forma de uma substância ou à facilidade com a qual ela flui, visto que esta propriedade está diretamente associada à trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Para estabelecer a consistência do concreto, foi tomado como base o determinado pela NBR 16889 da ABNT (2020) – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, que é um ensaio bastante utilizado em canteiros de obras e bastante útil na identificação de variações na uniformidade de uma mistura de determinadas proporções (NEVILLE, 2016). Para o presente estudo, o abatimento foi estipulado como uma variável controlada, fixado na faixa de 210 ± 20 mm, e o procedimento pode ser visualizado na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 - Enchimento do molde.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 17 - Medição do abatimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.4 Moldagem dos Corpos de Prova

Para cada um dos traços, foram moldados 34 corpos de prova (CP's) manualmente, de acordo com a NBR 5738 da ABNT (2015) – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Destes CP's, 15 eram prismáticos, com as dimensões de 200x100x80 mm (uma das dimensões padronizadas por norma para produção blocos para pavimentação), e 19 eram cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. No total, foram moldados 102 CP's.

No procedimento para os corpos de prova prismáticos (Figura 18), foram deferidos golpes nas laterais das formas com um martelo de borracha para realização do adensamento (em substituição à mesa vibratória, pois o Laboratório da UFJF não possui este equipamento). A Figura 19 apresenta as formas cilíndricas e prismáticas após o termino da moldagem.

Figura 18 - Moldagem dos CP's prismáticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 - Formas depois da moldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o processo de cura úmida, as formas eram cobertas por panos constantemente umedecidos com água (Figura 20) durante um período de cinco dias, para então serem desinformadas e transferidas para uma câmara úmida, onde permaneceram dentro de um tanque com água até a data de realização dos ensaios (Figura 21).

Figura 20 - Formas cobertas por panos úmidos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 21 - Corpos de prova imersos em água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Terminado o processo de cura úmida (Figura 22), os corpos de prova foram retirados do tanque e foram pesados submersos, saturados com superfície seca e secos para determinação da umidade e da massa específica (conforme especificado a seguir nos itens 5.2.5 e 5.2.6). Após a pesagem, os CP's sofreram o procedimento de retificação da superfície para melhor realização dos demais ensaios.

Figura 22 - Corpos de prova após o processo de cura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A regularização superficial dos corpos de prova cilíndricos foi realizado por meio de um corte da superfície irregular dos mesmos, com o auxílio de uma retificadora (Figura 23). Já para os CP's prismáticos, a regularização foi feita com massa de cimento e água, com o auxílio de um nível (Figura 24).

Figura 23 - Capeamento dos CP's cilíndricos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 24 - Capeamento dos CP's prismáticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.5 Determinação do Teor de Absorção

A absorção de água é o processo no qual a água ocupa os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, sendo fundamental para avaliar a qualidade do concreto, uma vez que a água é um agente deteriorante que transporta substâncias que podem causar danos ao material. Por isso, a redução do seu fluxo dentro da microestrutura do concreto é uma excelente forma de evitar um processo de deterioração, tanto no concreto quanto na sua armadura, aumentando, assim, a durabilidade (NEVILLE, 2016).

Este ensaio, bem como todos os outros descritos nesta pesquisa, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF (com exceção do ensaio de microscopia). Sua realização foi baseada no preconizado pela NBR 9778 da ABNT (2005) – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. O procedimento do ensaio pode ser visto na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Pesagem do corpo de prova saturado com superfície seca.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 26 - Pesagem do corpo de prova seco.

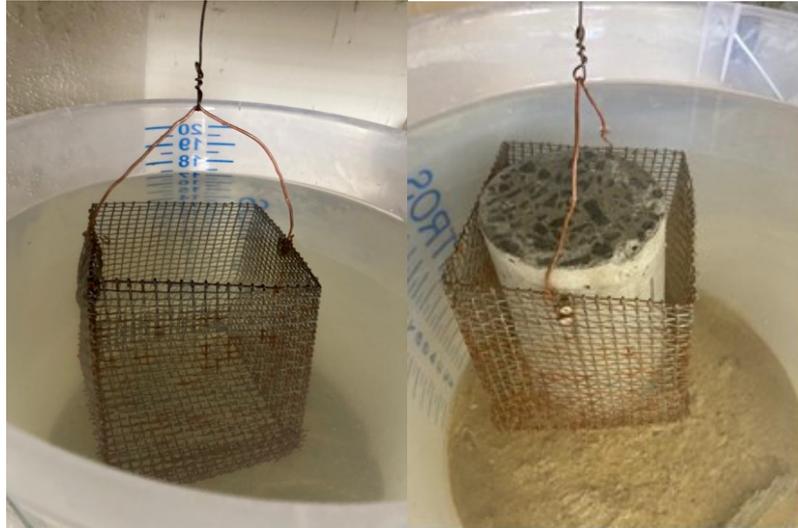


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.6 Determinação da Massa Específica

A determinação da massa específica dos corpos de prova tem por base a metodologia da NBR 9778 da ABNT (2005) – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. O procedimento é mostrado na Figura 26 e Figura 27.

Figura 27 - Pesagem do corpo de prova submerso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.7 Velocidade de Ultrassom

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pode ser entendida como a relação entre a distância percorrida por uma vibração em determinado intervalo de tempo. Este é um ensaio não destrutivo, que é empregado na indústria da construção civil para avaliação qualitativa do concreto. Desse modo, verifica-se a homogeneidade e o adensamento do mesmo, detectando falhas internas de concretagem, bem como, profundidade de fissuras e outras anomalias (COURA, 2009).

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto endurecido foi realizado de acordo com a NBR 8802 da ABNT (2019) – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. O equipamento utilizado foi o Proceq Pundit Lab+ (Figura 28), sendo que na Figura 29 é possível visualizar a medição sendo realizada.

Figura 28 - Proceq Pundit Lab+ utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 29 - Medição da velocidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.8 Resistência à Compressão Axial

A resistência a compressão do concreto é uma propriedade diretamente ligada à segurança e à estabilidade estrutural, sendo capaz de indicar eventuais variações da qualidade do mesmo, sejam elas relacionadas à dosagem ou aos insumos. A resistência do concreto é normalmente considerada sua propriedade mais relevante, embora, em muitas situações práticas, outras características, como a permeabilidade e durabilidade, possam ser fundamentais (METHA e MONTEIRO, 2014).

A norma adotada como referência para determinar a resistência característica à compressão foi a NBR 9781 da ABNT (2013) – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. A Figura 30 indica a prensa hidráulica utilizada no ensaio, enquanto a Figura 31 mostra a realização do mesmo.

Figura 30 - Contenco Pavitest utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova para o rompimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.9 Módulo Estático de Elasticidade

O módulo estático de elasticidade indica a rigidez do concreto no estado endurecido, que está relacionada com a hidratação do cimento presente, com travamento entre as partículas dos agregados, devido à forma e às rugosidades dos grãos, e pelo teor de material pulverulento. Essa é uma das propriedades mecânicas do concreto que merecem atenção especial, pelo fato

dela estar relacionada com a deformação do concreto sob ação das tensões. Isso partindo do princípio que as estruturas sujeitas a deformações tem maiores probabilidades de sofrer com patologias no elemento estrutural, como por exemplo a ocorrência de fissuras (SILVA, 2006).

Não há dúvidas de que o módulo de elasticidade aumente conforme ocorre o aumento da resistência à compressão do concreto, mas tudo o que pode ser dito é que esse aumento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o aumento da resistência à compressão (NEVILLE, 2016).

Para estabelecer o valor do módulo de elasticidade do concreto, ensaiou-se os corpos de prova cilíndricos conforme as prescrições da NBR 8522 da ABNT (2017) – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. A Figura 32 indica o posicionamento do Strain Gauge, enquanto a Figura 33 aponta o CP sujeito ao carregamento do ensaio.

Figura 32 - Strain Gauge colocado no corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 33 - Corpo de prova posicionado na prensa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, observa-se na Figura 34 o CP sendo submetido à ruptura para verificação do ensaio.

Figura 34 - Ruptura do corpo de prova cilíndrico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para o estudo da microestrutura do concreto, existem três fases de suma importância neste material, são elas: o agregado, a matriz (pasta de cimento) e uma interface bem definida entre estas, denominada zona de transição. Mehta e Monteiro (2014) apontam a relevância da

zona de transição nos estudos de microestrutura, uma vez que esta se mostra o ponto fraco do concreto. Sendo assim, suas características e componentes são determinantes para o concreto endurecido, influenciando na resistência mecânica e na durabilidade.

A variabilidade de componentes é o que determina as características dos concretos, por isso, o emprego do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permite evidenciar a morfologia dos compostos hidratados em função das condições de hidratação, além de possibilitar a visualização e investigação quanto à porosidade, microfissuras e homogeneidade da matriz de cimento e da interface desta com o agregado. Porém, esses dados só podem ser estudados mediante técnicas apropriadas, pois além de tratar de dimensões microscópicas e com grande variedade de tamanhos, também é possível incorrer em erros de análise se as imagens forem tomadas de pontos muito específicos que não representam as amostras de uma forma geral (POLISSENI, 2018).

As amostras para os ensaios de microscopia podem ser obtidas após a realização dos ensaios mecânicos, coletando-se fragmentos de concreto retirados da parte central dos corpos de prova, após rompê-los no ensaio de compressão axial (Figura 35) (DUART, 2008).

Figura 35 - Amostra utilizada nos ensaios de microscopia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para a pesquisa, utilizou-se o microscópio Quanta 250 (Figura 36), em alto vácuo, do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), cujas especificações técnicas são:

- a) modelo: Quanta 250;
- b) fabricante: FEI;
- c) ano: 2010;
- d) resolução: 3 nm (nanômetros);
- e) modo utilizado pelo detector: secondary electrons, 30 kV (quiloVolts);
- f) tensão da rede: 230 V (Volts), 50 a 60 Hz (Hertz);
- g) potência: até 3 kVA (quiloVolt-Ampere);
- h) tensão de aceleração do feixe: de 200 V a 30 kV;
- i) corrente do feixe: 2 μ A (microamperes).

Figura 36 - Microscópio Quanta 250.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Para a verificação da viabilidade técnica da utilização do pó de mármore como agregado miúdo na confecção de blocos de concreto para pavimentação urbana, elaborou-se um programa experimental para avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos pela substituição parcial de areia natural por resíduo do beneficiamento de mármore.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados finais dos ensaios e suas respectivas análises (os valores individuais de cada corpo de prova podem ser encontrados no Apêndice B), referentes aos ensaios de determinação da consistência, teor de absorção de água, massa específica, velocidade de ultrassom, resistência à compressão axial, módulo estático de elasticidade e microscopia eletrônica de varredura.

As amostras possuíam formatos variados e os ensaios foram realizados em quantidades diferentes de corpos de prova, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Tabela resumo dos ensaios realizados nas misturas da pesquisa.

Ensaio	Idade (dias)	Número de CP's Ensaiaados					
		T0		T15		T25	
		Prism.	Cilín.	Prism.	Cilín.	Prism.	Cilín.
Teor de Absorção (NBR 9778/2005)	28	15	19	15	19	15	19
Massa Específica (NBR 9778/2005)	28	15	19	15	19	15	19
Velocidade de Ultrassom (NBR 8802/2019)	28	15	19	15	19	15	19
Resistência à Compressão Axial (NBR 9781/2013)	28	15	0	15	0	15	0
Módulo Estático de Elasticidade (NBR 8522/2017)	28	0	9	0	9	0	9
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	28	0	1	0	1	0	1
Determinação da Consistência (NBR 16889/2020)	0	Estado Fresco					

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para pesquisas que envolvem análises numéricas de resultados, é de extrema importância que se faça uma validação por meio de métodos estatísticos desses resultados, visto que essa verificação confere maior credibilidade ao estudo. Sendo assim, optou-se por uma análise de variância (One-Way ANOVA) para os ensaios que envolviam média dos resultados, sendo eles: absorção, massa específica, velocidade de ultrassom, resistência a compressão e módulo de elasticidade.

A One-Way ANOVA é uma técnica estatística utilizada para fazer comparações entre três ou mais grupos em amostras independentes. Esse tipo de análise é utilizado para determinar se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Para o presente trabalho, essa análise de variância foi realizada com auxílio do programa GraphPad Prism 9.2.0.

6.1. CONSISTÊNCIA

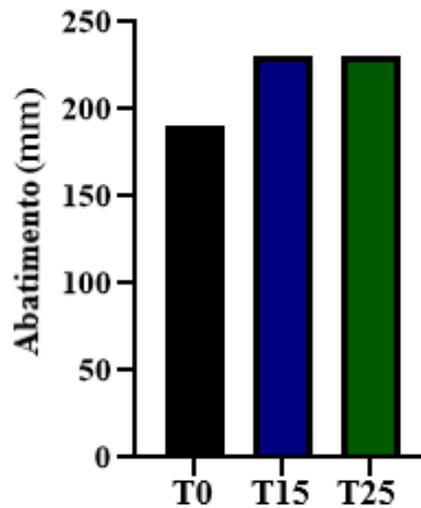
A consistência de cada uma das misturas (concretos) foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, preconizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020), e o abatimento foi fixado na faixa de 210 ± 20 mm. Na Tabela 14, são apresentados alguns dados da mistura, bem como os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone. Ademais, segue no Gráfico 10 um comparativo dos resultados do slump test.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de consistência.

CONSISTÊNCIA (NBR 16889/2020)					
Traço	Água de Saturação Agregados Miúdos (ml)	Água de Saturação Agregados Graúdos (ml)	Relação a/c	Aditivo Plastificante (ml)	Abatimento (mm)
T0	250	300	0,50	102	190
T15	250	300	0,48	102	230
T25	250	300	0,48	102	230

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 10 - Comparação dos resultados do ensaio de consistência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando-se os dados da Tabela 14 e Gráfico 10, constata-se o incremento na consistência das misturas, o que é revelado pelo aumento do abatimento ao se adicionar pó de mármore. Esse aumento no abatimento foi de 21,05% tanto para 15% quanto para 25% de substituição.

Além disso, com uma análise visual das misturas, observou-se também um pequeno aumento da exsudação à medida que aumenta o teor de pó de mármore, contudo, não houve segregação ou exsudação excessiva do concreto. Isso vai de encontro ao indicado por Bardini (2008), que assinala a adição de filler com tendência a reduzir a exsudação e a segregação das misturas.

Os resultados foram ainda melhores que o encontrado por Coura (2009), cujas misturas de concreto com adição do rejeito de mármore triturado apresentaram um incremento médio de 6% no abatimento, sem que houvesse também segregação ou exsudação excessiva do mesmo. Corinaldesi et al. (2010) também reiteram em seu estudo a grande eficácia do pó de mármore como filler, uma vez que garantiu uma boa coesão nas misturas de argamassa e concreto.

Segundo Neville (2016), alguns fillers são capazes de aumentar a plasticidade e a trabalhabilidade sem elevar o consumo de água da mistura, sendo o pó de mármore um deles. Tal comportamento deve-se à maior massa específica, a menor porosidade e a menor absorção de água do pó de mármore em relação à areia natural, fatos que proporcionam uma redução da porosidade da mistura. Em virtude disso, o resíduo não absorve parte da água de amassamento e, conseqüentemente, a consistência do concreto tende a ser mais fluida sem elevar seu consumo de água (BARDINI, 2008).

6.2. TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os corpos de prova utilizados para determinação da absorção de água por imersão foram ensaiados de acordo com as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo calculada pela média dos resultados individuais dos ensaios aos 28 dias.

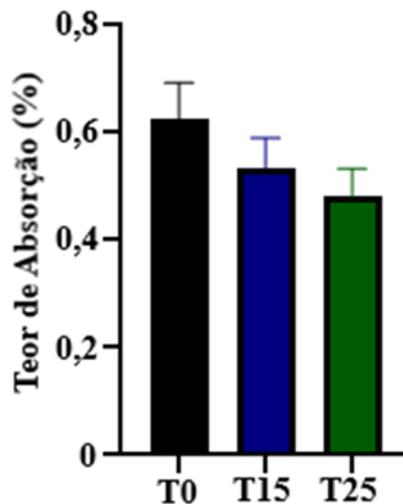
Os resultados finais obtidos são apresentados na Tabela 15 e no Gráfico 11, enquanto os valores individuais para cada corpo de prova se encontram no Apêndice B.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de absorção.

TEOR DE ABSORÇÃO (NBR 9778/2005)		
Traço	Teor de Absorção (%)	Desvio Padrão (%)
T0	0,62	0,0678
T15	0,53	0,0570
T25	0,48	0,0515

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 11 - Comparação dos resultados de absorção de água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o traço de referência, sem adição de resíduo, o valor obtido para a absorção de água foi de 0,62%. Ao comparar com os outros concretos analisados, pode-se observar um decréscimo de 14,52% no teor de água absorvida pelo traço experimental 01 (15% de pó de mármore) e um decréscimo de 22,58% para o traço experimental 02 (25% de pó de mármore).

Essa redução pode ser explicada pelo efeito filler, que permitiu o aumento do preenchimento dos vazios pelos finos oriundos da adição de resíduo (grãos menores do que

0,15 mm), e conseqüentemente, proporcionou uma melhor distribuição granulométrica. Poggiali (2010) assegura que isso proporciona menores capilares e conseqüentemente um menor fluxo capilar de água no interior da mistura, e desse modo, tem-se uma diminuição do coeficiente de absorção de água. Outro ponto a ser considerado, é o fato do pó de mármore apresentar menor absorção de água em relação a areia natural.

Os resultados encontrados estão de acordo com os obtidos por Coura (2009), que constatou que o teor de absorção de água apresenta uma tendência de decréscimo com o aumento da quantidade de adição mármore triturado. Dietrich (2015) e Elyamany et al. (2014) também acenaram resultados semelhantes, onde fillers oriundos do mármore, produziram concretos com menor absorção de água.

No caso de Pereira (2019), que optou pela substituição total da areia natural por pó de mármore, pôde-se observar um decréscimo superior a 5%, no teor de água absorvida. Em contrapartida, Nobrega (2015) que optou pela substituição parcial do cimento, obteve diminuição da absorção para teores inferiores a 20% de substituição, chegando a uma diminuição de até 14% no percentual de absorção.

Cabe ressaltar, que todas as peças ensaiadas apresentaram valor individual de teor de absorção de água menor que 7%, e valor médio inferior a 6%, atendendo assim, o especificado pela NBR 9781 da ABNT (2013).

6.3. MASSA ESPECÍFICA

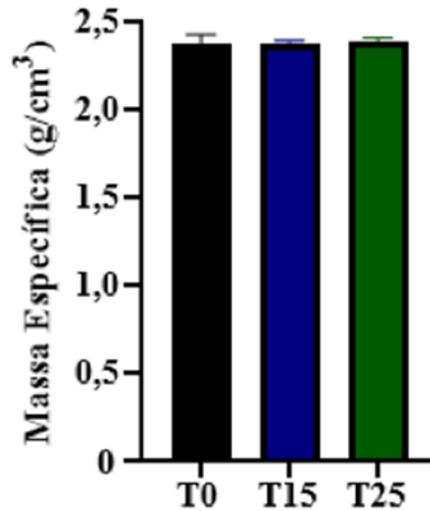
Assim como o ensaio de absorção, a massa específica foi determinada para todos os corpos de prova moldados e foram realizados de acordo com o preconizado pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Os valores finais foram calculados pela média e são apresentados na Tabela 16 e Gráfico 12, enquanto os valores individuais para cada corpo de prova se encontram no Apêndice B.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de massa específica.

MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778/2005)		
Traço	Massa Específica (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)
T0	2,386	0,0451
T15	2,387	0,0105
T25	2,396	0,0170

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 12 - Comparação dos resultados de massa específica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A análise One-Way ANOVA, realizada no programa GraphPad Prism 9.2.0, apontou que não há diferença significativa dos resultados para o T₁₅ e T₂₅, quando comparados com o traço de referência.

Entretanto, os resultados se mostraram coerentes acerca deste parâmetro, visto que foram obtidas massas específicas entre 2200g/cm³ e 2600g/cm³, além de desvio padrão baixo, o que denota uma boa uniformidade e uma qualidade satisfatória na produção dos corpos de prova. Cabe ressaltar, inclusive, que ao analisar o desvio padrão, observa-se que com a adição do pó de mármore foi obtido uma maior homogeneidade dos resultados, principalmente para o traço com 15% de substituição.

Ademais, os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados indicaram que o pó de mármore apresenta uma massa específica 9,7% maior que a areia natural. Além disso, o efeito filler do mármore tende a diminuir a porosidade da mistura, por conseguinte, esperava-se que a adição deste material ao concreto promovesse em um pequeno aumento de sua massa específica, conforme o denotado por Bardini (2008), Pereira (2019) e Coura (2009).

Porém, esse aumento da massa específica não foi observado em nenhum dos traços experimentais, efeito também constatado por Vinco (2017), que também lançou mão da análise de variância ANOVA e não encontrou significância dos fatores resíduo nos resultados.

6.4. VELOCIDADE DE ULTRASSOM

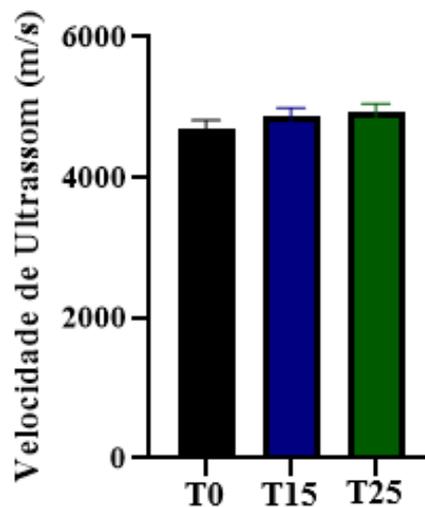
A determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto endurecido foi realizada, para todos os corpos de prova moldados, de acordo com a NBR 8802 da ABNT (2019). Os resultados finais, representados pelas médias, estão indicados na Tabela 17 e Gráfico 13, enquanto os valores de cada CP individualmente encontram-se no Apêndice B.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de velocidade de ultrassom.

VELOCIDADE DE ULTRASSOM (NBR 8802/2019)		
Traço	Velocidade (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
T0	4692	117,3869
T15	4860	131,4109
T25	4936	112,3026

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 13 - Comparação dos resultados de velocidade de onda ultrassônica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tendo em vista os resultados, conclui-se que tanto a mistura convencional quanto aquelas com adição de pó de mármore se mostram com excelente nível de homogeneidade. Além disso, é possível observar que os corpos de prova que contêm pó de mármore apresentam valores superiores a aqueles com areia natural. Os resultados para os traços com 15% e 25% de resíduo de mármore foram respectivamente 3,58% e 5,20% maiores do que o valor encontrado para o traço de referência, 4692 m/s.

Constata-se que os dados obtidos vão ao encontro dos resultados de Pereira (2019), onde os valores da velocidade de ultrassom encontrados aumentaram em cerca de 4% com a substituição da areia natural por pó de mármore. De maneira semelhante, Coura (2009) e Elyamany et al. (2014) em suas pesquisas acenam sobre a tendência de diminuição do índice de vazios com o aumento da quantidade do resíduo na mistura, assegurando que o mesmo tende a deixá-la mais densa e compacta.

Os concretos com pó de mármore apresentaram maior velocidade de propagação de onda que o concreto convencional, o que pode ser explicado pelo efeito filler, uma vez que a densidade está relacionada com a correta seleção da proporção e com o tamanho adequado dos grãos do agregado, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores. Outro ponto a ser considerado, é a baixa porosidade do agregado oriundo do mármore.

6.5. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

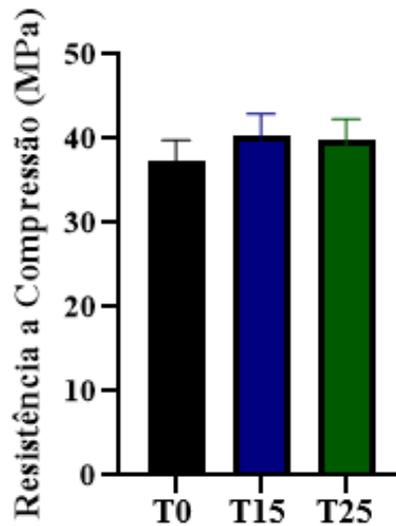
Todos os corpos de prova prismáticos confeccionados foram utilizados para execução do ensaio de resistência característica à compressão, aos 28 dias (quinze CP's para cada traço). Os resultados obtidos através dos cálculos indicados pela NBR 9781 da ABNT 2013, são apontados na Tabela 18 e Gráfico 14, enquanto isso, os valores individuais para cada corpo de prova se encontram no Apêndice B.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de compressão.

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (NBR 9781/2013)				
Traço	Resistência Média (fp) (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Student	Resistência Característica (f _{pk}) (MPa)
T0	37,37	2,3561	0,868	35,32
T15	40,28	2,5800	0,868	38,04
T25	39,94	2,2823	0,868	37,96

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 14 - Comparação dos resultados de resistência a compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os três concretos estão em conformidade com as especificações da NBR 9781 da ABNT (2013), uma vez que ultrapassaram o limite mínimo para as solicitações de tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha (35 MPa).

Ao analisar os resultados do ensaio, é possível observar um aumento de 7,70% da resistência característica para o T₁₅ em relação ao concreto de referência. Já para o T₂₅ o acréscimo da resistência foi de 7,47%.

Constata-se que o concreto T₁₅ foi o que apresentou maior valor de resistência característica. Entretanto, o traço contendo 25% de pó de mármore pode ser considerado como aquele com melhor desempenho, uma vez que apresentou um resultado mais consistente (menor desvio padrão) e um valor de resistência apenas infimamente menor que o de T₁₅.

É possível aferir certa coerência entre os resultados de resistência a compressão encontrados nessa pesquisa com os valores comumente encontrados para misturas com substituição de seus constituintes por pó de mármore, avaliados previamente na revisão bibliográfica.

Tennich et al. (2015) utilizou resíduo de mármore em concreto auto adensável e encontrou um aumento na resistência à compressão de cerca de 6,7%. Já para o estudo de Pereira (2019), a substituição da areia natural pelo rejeito em blocos de concreto para pavimentação atingiu um acréscimo 6,52%.

Conforme Pedroso (2017), a adição do mármore permitiu um aumento na resistência à compressão dos concretos na ordem de 4%. Enquanto Coura (2009), analisando-se isoladamente a influência da adição do rejeito de mármore na resistência à compressão axial,

verificou um incremento de até 12,8%. Além disso, pesquisas de Almeida et al. (2007) e Nobrega (2015) também apontam que a utilização de resíduos de rochas ornamentais, acarretam no acréscimo da resistência à compressão do concreto.

Essa melhora da resistência pode ser explicada pela junção de alguns fatores, sendo o primeiro deles o efeito filler do pó de mármore, que por sua vez permitiu a redução dos vazios e o aumento da densidade do concreto (BARDINI, 2008). O que vai ao encontro do resultado obtido para o ensaio de velocidade de ultrassom.

Além do efeito filler, outro fator que influenciou para esse aumento de resistência foi a diferença do formato dos grãos de areia natural e pó de mármore. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), concretos confeccionados com agregados triturados ou britados (grãos angulosos e com textura rugosa) apresentam resistência superior aos concretos confeccionados com agregados naturais (grãos arredondados e lisos), devido ao melhor intertravamento e maior aderência com a pasta de cimento.

A baixa porosidade do pó de mármore em relação à areia natural também ajuda a explicar os resultados, visto que de acordo com Buest Neto (2006) e Neville (2016), a porosidade do agregado pode afetar a resistência à compressão do concreto.

Por fim, a menor relação água/cimento dos concretos T15 e T25, quando comparados com o traço de referência, é o fator mais importante do ponto de vista da resistência. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), essa relação afeta a porosidade não só da matriz (pasta de cimento), mas também da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo. KWAN et al. (2014) também sustentam que a diminuição da relação água/cimento (a/c) pode ser consequência do empacotamento dos grãos no efeito filler, aumentando, assim, a resistência e durabilidade do concreto.

6.6. MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O ensaio de módulo de elasticidade foi executado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), sendo realizados três grupos de ensaios por mistura. Para cada grupo de ensaio foram utilizados cinco corpos de prova, sendo dois corpos de prova ensaiados para a determinação da resistência à compressão axial e três para a determinação do módulo de elasticidade, totalizando, assim, quinze exemplares por traço (seis para resistência e nove para o módulo propriamente dito).

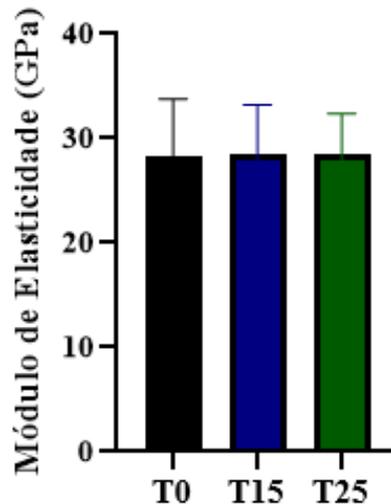
Os resultados individuais obtidos nos ensaios para a determinação do módulo de elasticidade de cada um dos corpos de prova são mostrados no Apêndice B. A Tabela 19 e o Gráfico 15 apresentam os resultados finais do ensaio.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE (NBR 8522/2017)		
Traço	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
T0	28,36	5,1011
T15	28,48	4,4506
T25	28,54	3,6347

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 15 - Comparação dos resultados de módulo de elasticidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A verificação ANOVA dos resultados apontaram que os concretos com adição de mármore não apresentaram diferença significativa no resultado de módulo de elasticidade em relação ao concreto convencional.

Segundo Neville (2016), o fato da massa específica do pó de mármore ser superior à massa específica da areia natural, resulta em uma redução da porosidade desse resíduo. Essa menor porosidade aliada ao menor volume de vazios (devido ao efeito filler) faria com que o módulo de elasticidade das misturas confeccionadas com resíduos apresentasse resultados superiores ao da mistura de referência.

Além disso, de acordo com Kitamura (2011), misturas com grãos de forma angulosa e a textura áspera proporcionam menores microfissurações nas interfaces agregado-pasta de cimento, quando comparadas às misturas cujo agregado miúdo possui grãos arredondados e

lisos. Isso ocorre pela minimização das deformações longitudinais oriundas da ação de cargas, sendo assim, a substituição dos agregados elevaria o módulo de elasticidade do concreto.

Em suas pesquisas, Coura (2009) e Duarte (2015) encontraram maiores resultados de módulo de elasticidade para as misturas com adição de resíduo de mármore que as de referência. Em contrapartida, Nobrega (2015) assegurou uma diminuição gradual do módulo de elasticidade dos corpos com o aumento da porcentagem do resíduo de mármore na formulação de argamassas.

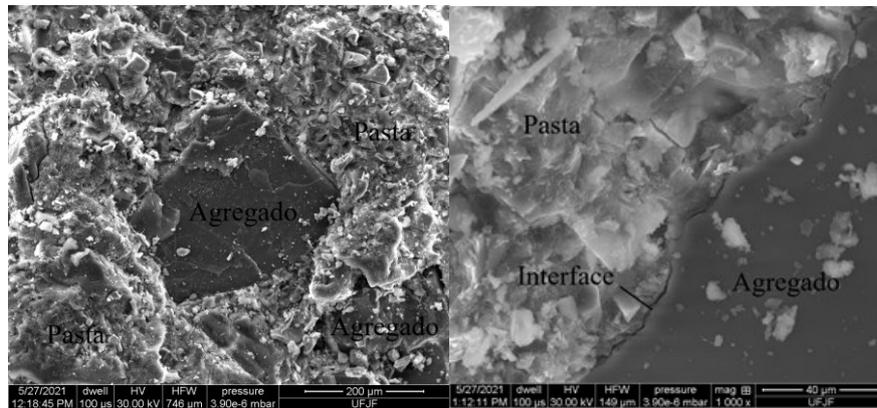
Sendo assim, a expectativa era de um pequeno acréscimo no módulo de elasticidade a medida que se aumentasse o percentual de pó de mármore, o que não ocorreu nos resultados encontrados na pesquisa. Contudo, Neville (2016) avaliza que o módulo de elasticidade aumenta conforme ocorre o aumento da resistência à compressão do concreto. Entretanto, esse aumento do módulo de elasticidade do concreto é consideravelmente menor do que o aumento da resistência à compressão, explicitando, assim, o motivo de não ter ocorrido um aumento considerável no módulo de elasticidade.

6.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise da microestrutura do concreto através do microscópio eletrônico de varredura, realizada em concretos com idades superiores a 28 dias, permitiu uma visualização geral da pasta de cimento, do agregado e da interface entre eles; bem como uma comparação da homogeneidade, porosidade, e microfissuras da matriz de cimento dos três diferentes traços.

Primeiramente, as imagens foram direcionadas para o local mais próximo ao agregado do concreto de referência, somente para a distinção entre pasta de cimento e agregado. Em seguida, buscou-se uma aproximação maior para que fosse possível observar a zona de transição (ZT) entre agregado e matriz da pasta de cimento. As micrografias apresentadas na Figura 37 possibilitam a visualização do agregado, da pasta de cimento e da interface entre eles no concreto de referência.

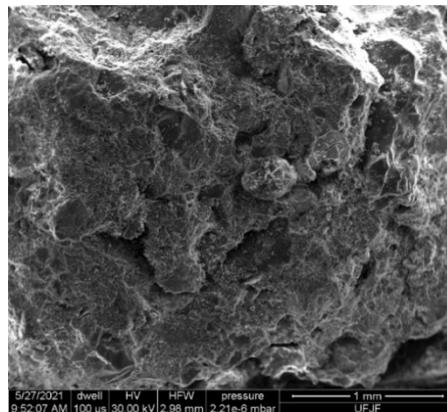
Figura 37 - Micrografias de 200x e 1000x, respectivamente, destacando a visão geral e a zona de transição entre matriz e agregado do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

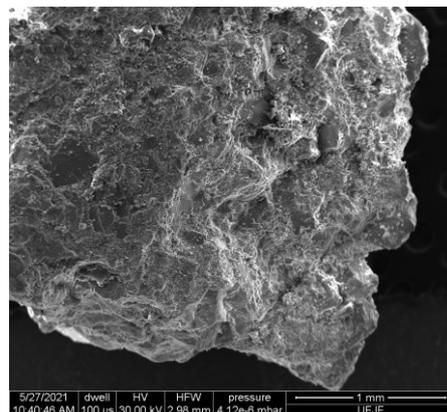
O passo seguinte foi a observação da porosidade da pasta de cimento, principalmente a presença de poros de grande diâmetro, a fim de uma comparação entre os três tipos de concreto, conforme apontado na Figura 38, Figura 39 e Figura 40.

Figura 38 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T₀.



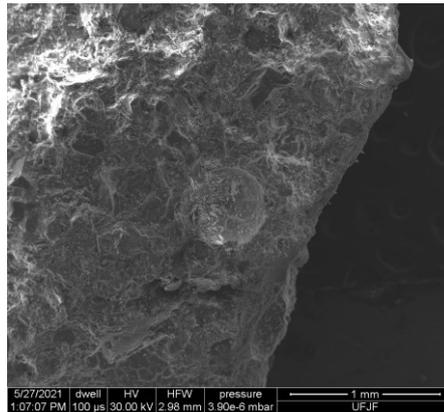
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 39 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T₁₅.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 40 - Micrografia de 50x ilustrando a porosidade do concreto T₂₅.



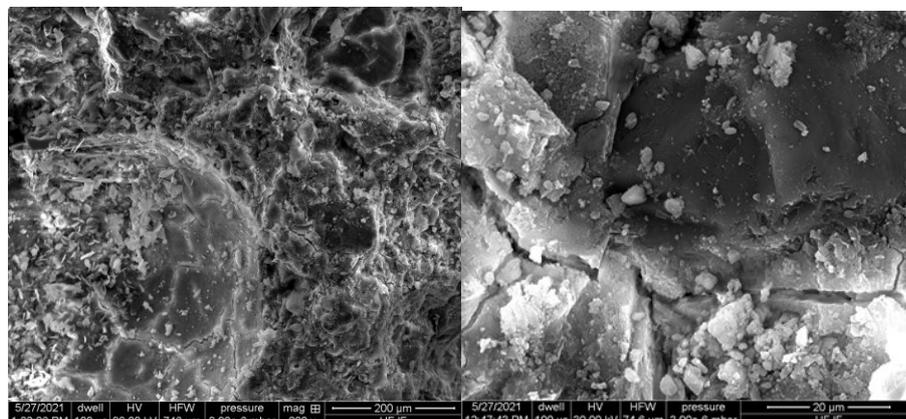
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Apesar da porosidade não estar sendo quantificada, é possível observar que o concreto de referência se mostrou mais poroso quando comparado aos concretos com substituição de areia natural por pó de mármore. Não só pela quantidade, mas também pela magnitude dos poros existentes nas amostras.

A diminuição da porosidade é explicada pela redução da relação água/cimento, uma vez que os produtos de hidratação do cimento formados na matriz de pasta apresentam tamanhos relativamente maiores quando incorre maiores quantidades de água. Em decorrência dos cristais maiores, há formação de vazios entre eles, resultando em uma pasta de cimento mais porosa (DE SÁ, 2006).

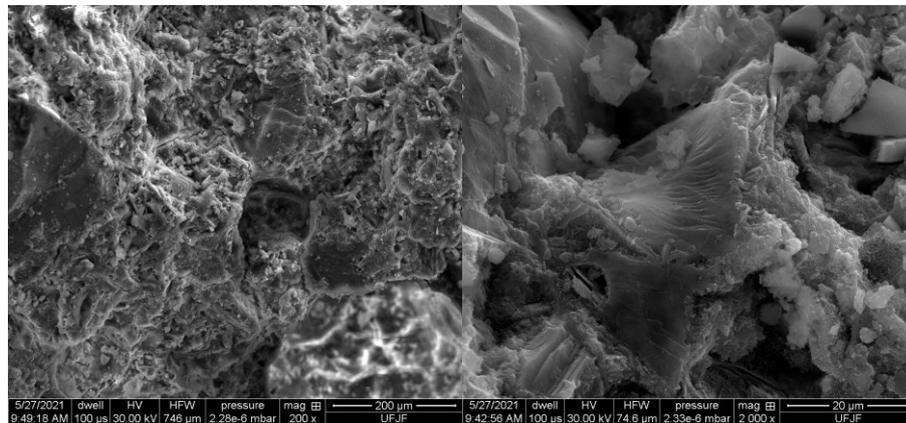
Logo depois de observar a porosidade, buscou-se uma verificação das microfissuras dos concretos, com uma aproximação de 200x, e uma maior aproximação, de 2000x. Segue na Figura 41, Figura 42 e Figura 43 as micrografias para a observação das microfissuras.

Figura 41 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T₀ ilustrando as microfissuras existentes.



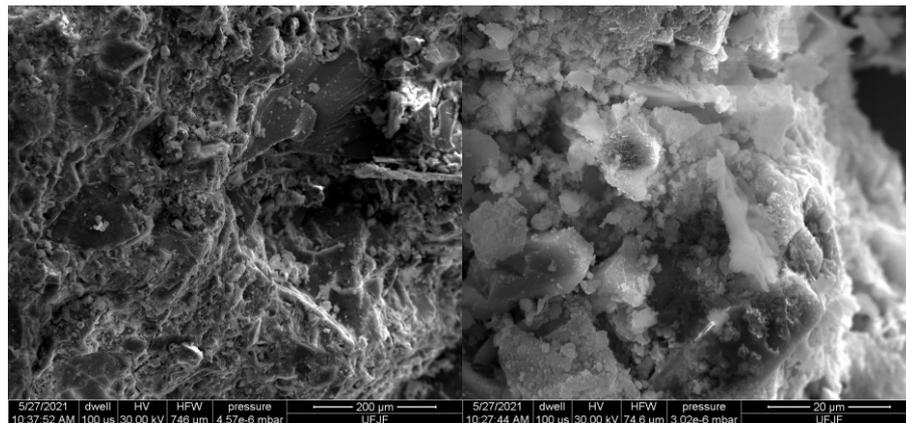
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 42 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T₁₅ ilustrando as microfissuras existentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 43 - Micrografias de 200x e de 2000x, respectivamente, do concreto T₂₅ ilustrando as microfissuras existentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pelas imagens verifica-se que as microfissuras são praticamente imperceptíveis para os traços experimentais, mas são facilmente percebidas no traço de referência, tanto para a aproximação de 200x, mas principalmente para 2000x. Essa diferença é visualizada pela quantidade de fissuras e pela magnitude das mesmas, cuja abertura e profundidade são consideravelmente maiores para o T₀.

Finalizando a análise microestrutural, é possível observar que os traços T₁₅ e T₂₅ apresentam matrizes mais homogêneas e densas (compactas) que o T₀, com menos poros e fissuras, bem como com poros de menor diâmetro e fissuras de menor abertura.

A explicação para a diminuição da porosidade se dá pela diferença na relação a/c, como apontado por De Sá (2006). Enquanto a menor microfissuração é proporcionada pela minimização das deformações longitudinais, oriunda do melhor encaixe dos grãos de forma

angulosa e textura áspera (pó de mármore), quando comparados com grãos arredondados e lisos (areia natural) (KITAMURA, 2011).

Conclui-se, portanto, que os resultados encontrados estão de acordo com o indicado por De Sá (2006), Duart (2008) e Bello (2016), cujas imagens da microscopia eletrônica de varredura revelaram concretos com adição de filler mais homogêneos, com menos poros ou com poros de menor diâmetro e com pasta mais densa em relação ao traço de referência.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar o comportamento físico e mecânico da adição de filler de mármore em substituição parcial da fração de areia natural na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, para isso realizou-se ensaios em três traços distintos de concreto, tais quais: o traço de referência (T_0), o traço experimental 1 (com 15% de substituição de areia natural por pó de mármore, T_{15}) e o traço experimental 2 (com 25% de substituição de areia natural por pó de mármore, T_{25}). Analisando o resultado dos ensaios foi possível tirar as seguintes conclusões:

- a) o pó de mármore tem influência na consistência dos concretos. Apesar do menor consumo de água na mistura, os concretos experimentais alcançaram um maior abatimento (ambos com 230mm), enquanto o concreto de referência atingiu 190mm. Essa melhora na plasticidade da mistura, sem que houvesse segregação ou exsudação excessiva da mesma, é devido à baixa porosidade e absorção dos grãos de mármore;
- b) os três traços ensaiados apresentaram teor de absorção de água inferior a 6% (0,62% para o T_0 ; 0,53% para o T_{15} e 0,48% para o T_{25}); e todos os valores individuais dos corpos de prova moldados foram menores que 7%, atendendo assim, as delimitações da NBR 9781 da ABNT (2013). Dito isso, confirmou-se a expectativa de diminuição da absorção de água conforme o percentual de substituição foi aumentado;
- c) as massas específicas obtidas para T_0 , T_{15} e T_{25} , foram, 2,386 g/cm³, 2,387 g/cm³ e 2,396 g/cm³, respectivamente. À medida que se aumentasse o teor de pó de mármore esperava-se um pequeno aumento na densidade de massa devido a massa específica do pó de mármore e ao efeito filler propiciado pelo mesmo. O que não ocorreu na prática, visto que os resultados não apresentaram diferença significativa;
- d) se tratando de velocidade de onda ultrassônica, os três concretos apresentaram resultados excelentes, superiores a 4500 m/s. Com a ressalva de que a adição de pó de mármore permitiu uma mistura mais homogênea em relação à convencional, o que é indicado pelo aumento da velocidade à medida que aumentou-se o percentual de substituição, T_0 (4692 m/s), T_{15} (4860m/s) e T_{25} (4936 m/s);
- e) analisando a resistência à compressão axial, o comportamento foi similar a absorção e a velocidade de ultrassom, onde o concreto de referência já evidenciou bons resultados, mas os valores correspondentes aos traços experimentais se

mostraram ainda melhores. A resistência estimada para o T_0 foi de 37,37 MPa, enquanto para o T_{15} foi 40,28 MPa e para o T_{25} 39,94 MPa; todos superiores aos 35,00 MPa (valor estabelecido como mínimo pela NBR 9781/2013), sendo, portanto, aprovados.

- f) a comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos três concretos não assinalou diferença significativa entre eles, sendo que os valores encontrados foram 28,36 GPa, 28,48 GPa e 28,54 GPa para T_0 , T_{15} e T_{25} , respectivamente. Apesar dos resultados serem positivos, seria interessante o aumento do módulo de elasticidade, ao passo que quanto maior essa propriedade menor tende a ser as deformações das estruturas, e por consequência, menor a probabilidade de esta sofrer com patologias. Posto isso, a falta de aumento significativo pode ser justificada pelo fato do incremento do módulo de elasticidade, em geral, ser menos acentuado que a resistência à compressão.
- g) quanto à análise da microscopia dos concretos, observou-se uma estrutura mais homogênea para os concretos experimentais, com menor porosidade (não só pelo número de poros, mas também pela dimensão dos mesmos) e com menos fissuras que o concreto de referência.

Levando em consideração que todos os equipamentos, materiais, metodologias de ensaio e operadores foram os mesmos para os corpos de prova dos três traços, e que, a única diferença entre eles está na proporção de areia natural e do pó de mármore, pode-se afirmar que esta mudança foi a responsável pelas variações ocorridas nos resultados obtidos.

Constata-se que as características do concreto em termos da aplicabilidade não apresentam prejuízos. Com exceção de massa específica e módulo de elasticidade, que não apresentaram diferença significativa, todas as outras propriedades apresentaram melhora nos resultados, de forma que os concretos experimentais se mostraram superiores aos traços similares fabricados com agregados naturais. Isto indica que os resultados da pesquisa são, de certa forma, condizentes com a literatura.

Visto que a resistência a compressão, o módulo de elasticidade e a absorção de água são algumas das propriedades que mais influenciam na durabilidade do concreto, espera-se que os concretos experimentais se mostrem duráveis em relação a entrada de agentes agressivos, com durabilidade ainda maior que o concreto de referência. Portanto, é possível afirmar que a substituição parcial da areia natural por pó de mármore (tanto 15% como 25%), é tecnicamente viável no emprego como agregado miúdo para produção de blocos de pavimentação.

Finalmente, pode-se concluir que pesquisas associadas a utilização de novas alternativas que beneficiem a economia e o meio ambiente, mais especificamente a utilização do pó de mármore na fabricação de blocos para pavimentação, são sempre de grande valia. Dessa forma, pode-se afirmar que esses estudos apontam maneiras para diminuir a deposição de resíduos e a exploração de recursos não renováveis, podendo significar, ainda, a redução de custos nas obras da construção civil.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Dada a relevância do tema, sugere-se o prosseguimento dos estudos para que o entendimento seja ampliado. Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros e continuidade desse projeto, tem-se:

- a) avaliação da permeabilidade dos blocos para o traço proposto;
- b) analisar a viabilidade econômica do emprego de pó de mármore em blocos de pavimentação para confirmar a redução dos custos de produção das peças;
- c) realizar o ensaio de Difração de Raios X para a identificação de fases cristalinas e obtenção de informações sobre a estrutura cristalográfica das amostras;
- d) realizar estudo semelhante para verificar a viabilidade de aplicação do pó de mármore para outros tipos de aplicação que não blocos de pavimentação, a exemplo de concretos estruturais, de alta resistência e/ou auto adensáveis.

REFERÊNCIAS

- AKBULUT, H.; GÜRER, C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**, v. 42, n. 5, p. 1921-1930, 2007.
- AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2658-2663, 2010.
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; BRITO, J.; SANTOS, J. R. High-performance concrete with recycled stone slurry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 210–220, 2007.
- ALVES, J. D. **Materiais de construção**. 8ª edição. Goiânia: Editora da UFG e Editora da UCG, 2006.
- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. 1ª edição Editora PINI, 2012.
- ANDRADE, D. T.; VIEIRA, S. P.; OLIVEIRA, D. R.; MORAIS, H. P. Avaliação da utilização de agregados reciclados na produção de peças para pavimentação (pavers). In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO – CBC2018, 2018. **Anais...** Foz do Iguaçu - PR. p. 6, 2018
- AQEL, M.; PANESAR, D. K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 359-368, 2016.
- ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, p. 9, 2016.
- ARAÚJO, T. C. B.; DOURADO, H. Avaliação de desempenho de pavers intertravado produzidos com rejeitos gerados nos desdobramentos de rochas ornamentais. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 2, p. 245-261, 2019.
- ARY JUNIOR, I. J. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessias urbanas – estudo de caso Guaiúba, CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 5738** - Versão Corrigida: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, p. 9, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7211** – Versão Corrigida: Agregados para Concreto - Especificações. Rio de Janeiro, p. 9, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8522** – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 20 p, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8802** – Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, p. 11, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 9778** – Versão Corrigida: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, p. 4, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 9781** – Peças de concreto para pavimentação Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, p. 21, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 10004** – Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, p. 71, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 11768** – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, p. 27, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15116** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 12, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16697** – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, p. 12, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16889** – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, p. 5, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 45** – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, p. 8, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 46** – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, p. 6, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, p. 6, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 53** – Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, p. 8, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 248** – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, p. 6, 2003.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO (ANEPAC). **Mercado - Perspectivas para o setor de agregados**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 12 mai. 2020.

BARDINI, V. S. D. S. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

BARROS, A. R.; GOMES, P. C. C.; BARBOZA, A. S. R.; SILVA, J. L. Estudos e resultados sobre a utilização do resíduo do corte do mármore e granito em materiais à base de cimento. **XI ENTAC - Encontro Nacional do Ambiente Construído. Florianópolis, 2006.**

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para produção de concretos convencionais.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 5ª edição. **Brasil: Livro Técnico e Científicos,** Rio de Janeiro, v.1, p. 488, 1994.

BELLO, R. H.; MEZARROBA, G.; CORREIA, S. L.; SCHACKOW, A. Caracterização microestrutural de concretos com e sem resíduo da indústria de papel e celulose em substituição parcial ao cimento Portland. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2016. **Anais...** Águas de Lindóia, SP. p. 810–819, 2016.

BEZERRA, F. D. Rochas ornamentais: novas perspectivas de investimento. **Caderno Setorial ETENE,** Fortaleza, 2017.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BEZERRA, R. R. CARREIRA, J. C. AGUIAR, R. G. **Estudo de caso da quantidade e destinação final dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares do bairro Urupá na cidade de Ji-Paraná - RO.** 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8164060-Estudo-de-caso-da-quantidade-e-destinacao-final-dos-residuos-solidos-organicos-domiciliares-do-bairro-urupa-na-cidade-de-ji-parana-ro.html>. Acesso em: 12 mai. 2020.

BISPO, L. H. O.; ALMEIDA, S. L. M. Obtenção da areia artificial a partir de finos de pedra – análises de ensaios. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. **Boletim Técnico.** 2003.

BRASIL. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Diário Oficial da União.** Brasília, DF. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf. Acesso em: 27 mai. 2020.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. p. 169, 2006.

CALMON, J. L. TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; SILVA, S. A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais...** Salvador BA: ANTAC, p. 64-75, 1997.

CAMPOS M. A.; PASSOS, L.; FERRÃO, A. M. A.; MORENO JUNIOR, A. L. Argamassa e concreto com baixo teor de cimento: utilização de filler cerâmico e sílica ativa. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2018. **Anais...** Maceió, 2018.

CAMPOS, H. F.; MARQUES FILHO, J.; KLEIN, N. S. Concretos sustentáveis otimizados por modelos de empacotamento de partículas: revisão bibliográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2016. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 31, n. 2, p. 91–104, 2016.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.

CECEL, R. T. **Influência do uso de filler calcário como material cimentício complementar nas propriedades de fratura de pastas de cimento**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2019.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. **RILEM Proceedings Pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010.

COURA, C. V. G. **Análise experimental sobre a substituição da agregado miúdo por mármore triturado na confecção de concreto**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2009.

COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. Fabrico e propriedades do betão. **Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil**. Vol. I. ed. LNEC. p. 401, 1997.

CRUZ, A. C. F.; CABRAL, R. F.; BANDEIRA, C. F.; MONTORO, S. R. Caracterização do resíduo de corte de mármore e granito de marmoraria e análise da viabilidade de substituição parcial do cimento portland para produção de pavers. **Revista Univap**, v. 26, n. 51, p. 91-107, 2020.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2013.

DE SÁ, M. V. V. A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, p. 140, 2006.

DESTEFANI, A. Z. **Adição de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de blocos prensado de encaixe.** Dissertação de Mestrado. Campos de Goytacazes: Universidade Federal do Norte Fluminense, 2009.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com a adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons de cloreto.** Dissertação de Mestrado. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, p. 179, 2015.

DOMTOTAL. **Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil.** 2018. Disponível em: <https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/>. Acesso em: 10 out. 2019.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento.** Dissertação de Mestrado. Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, p. 134, 2008.

ELYAMANY, H. E.; ABD ELMOATY M.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, Faculty of Engineering - Alexandria University. v. 53, n. 2, p. 295–307, 2014.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, p. 202, 2007.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing.** New York: Springer Science Business Media, 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese Livre Docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 102, 2000.

KITAMURA, S. **Estudo experimental sobre a influência da substituição do agregado miúdo natural por granito triturado, nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, n. 61, p. 270-277, 2014.

LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 10, p. 1481 – 1488, 1997.

LAWRENCE, P.; CYR, M., M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars - effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 939-1947, 2003.

LEITE, B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 290, 2001.

LI, Z. **Advanced concrete technology.** John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2011.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

LOPES, J. L.; FIGUEIREDO, P. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, na produção de concretos. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG, 2006. **Anais...** Goiânia, 2006.

MAMLOUK, M. S.; ZANIEWSKI, J. P. **Materials for civil and construction engineers.** 3ª ed. New Jersey, United States of America: Pearson, 2014.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de aço.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais.** IBRACON. 2ª ed. São Paulo, p. 751, 2014.

MENDES, M. V. A. **Análise técnica da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético na produção de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás – UFG. 2016.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus, Feira de Santana**, v. 26, n. 1, p. 49-61, 2002.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; GAMA, J. L. C. N.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S. Produção de pisos intertravados com utilização de resíduos de serragem de rochas ornamentais. In: **ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, v. 11, p. 4227-4236, 2006.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 147-154, 2011.

NEHDI, M.; MINDNESS, S.; AİTCIN, P. C. Rheology of high-performance concrete: effect ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 687-697, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª ed. Bookman Editora. Porto Alegre p. 887, 2016.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S. **Advanced concrete technology: constituent materials.** Elsevier, 2003.

NOBREGA, A. K. C.; DE SÁ, M. V. V. A.; AMARAL, R. A.; GOIS, S. E.; DANTAS, G. M. Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 13172-13179, 2015.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, p. 141, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**. São Paulo – SP. v. 224, p. 119-137, 2000.

OLIVEIRA, P. F. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore, como agregado miúdo, na confecção de argamassas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói. p. 83, 2007.

PALM, S.; PROSKE, T.; REZVANI, M.; HAINER, S.; MÜLLER, C.; GRAUBNER, C.-A. Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and Building Materials**, p. 308–318, 2016.

PANESAR, M.; AQEL, D. K. Efeitos físicos e químicos do filler calcário na hidratação de pasta de cimento e argamassa curadas à vapor. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 2, p. 191-205, 2020.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DUARTE, E. B. L. Viabilidade econômica da utilização de resíduos de demolição reciclados na execução do contra piso de um edifício localizado na zona leste da cidade de São Paulo. **Gestão Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 928-943, 2014.

PEDROSO, D. E.; PEDROSO, C. L.; FILHO, J. R. S.; PRESA, M.; LIMA, E. P. Concretos utilizando resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como substituição parcial do cimento Portland. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2017. **Anais...** Ponta Grossa, 2017.

PEREIRA, G. M. M. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore, como agregado miúdo, na produção de pisos intertravados**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz De Fora, UFJF. 2019.

PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de construção**. 2ª ed. São Paulo: Ed. Érica Saraiva, p. 144, 2016.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland e com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, p. 150, 2010.

POLISSENI, G. C. **Efeito de finos reciclados de concreto (FRC) de diferentes origens nas propriedades físico-químicas e mecânicas de matrizes cimentícias**. Dissertação de Mestrado. UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. p. 184, 2018.

- PONTE, I. F.; VIDAL, F. W. H. Valorização de resíduos de serrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil. In: V SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. 2005. **Anais...** Recife, p. 117, 2005.
- POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete petrography – A handbook of investigative techniques.** Crc Press, 2ª ed. 2016.
- SALES, A. T. C.; MENDES, J. S. S. Argamassas com agregado miúdo de resíduos de recauchutagem de pneus. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 4, 2013. **Anais...** Aracaju: SIMTEC. vol. 1, n. 1, p. 10-25. 2013.
- SANTOS, R. S.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **Holos.** v. 5, p. 125-135, 2012. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/5287/e68a34bdcc195f5354a47801292f9e3f3112.pdf>. Acesso em: 15 out. 2019.
- SB PISOS. **Pavimento.** Disponível em: <http://www.pisoacabado.com.br/pavimento.html>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SEQUEIRA, E. M. A Influência da adição de filler calcário em substituição parcial ao cimento em argamassa estabilizada de revestimento de paredes e tetos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental.** v. 9, p. 20-38, 2020.
- SILVA, C. O.; MARCHIONI, N. **Pavimento intertravado: nova normatização para sua execução - Concreto e construções.** São Paulo, Ano XXXIX, p. 37-44, jun. 2011.
- SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. p. 164, 2006.
- SOARES, S. M. M. N. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2010.
- SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente construído.** Porto Alegre. v. 4, n. 4, p. 33-46, 2004.
- TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials.** v. 91, p. 65-70, 2015.
- TEODORO, S. B. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural.** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz De Fora (UFJF). 2013.
- TSIVILIS, S.; CHANIOTAKIS, E.; KAKALI, G.; BATIS, G. An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. **Cement and Concrete Composites.** v. 24, n. 3-4, p. 371-378, 2002.
- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. p. 168, 2004.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE, R.; SINGH, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015.

VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ed. CETEM/ MCTI, p. 700, 2013.

VINCO, L. G. F.; OLIVEIRA, J. D.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 165-182, 2017.

ULIANA, J. G. **Estudo de tratamento térmico para aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial de cimento**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. p. 214, 2014.

WIEBBELLING, P. O. G. **Pavimento com blocos intertravados de concreto: estudo de caso na Univantes**. Trabalho de Conclusão de Curso. Lajeado: Univantes, p. 72, 2015.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil., Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Rio Grande do Sul, 2010.

**APÊNDICE A – PLANILHA DE PASSANTE ESTIMADO PARA CADA
PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO**

Tabela 20 - Passante estimado em cada peneira para os percentuais de substituição.

Peneira	Empacot. Ótimo Alfred	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
25	100	100,000	100	100	100	100	100	100
19	100	99,059	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592
9,5	74,0275	65,477	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769
4,8	54,1972	46,276	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765
2,4	38,255	37,365	37,7424	38,1198	38,4973	38,8748	39,2523	39,6297
1,2	26,2503	33,279	33,8108	34,3426	34,8743	35,406	35,9377	36,4694
0,6	17,1594	24,552	25,235	25,9182	26,6015	27,2847	27,968	28,6512
0,3	9,92684	17,367	17,5857	17,8044	18,0231	18,2418	18,4604	18,6791
0,15	4,33042	9,522	9,48322	9,44464	9,40606	9,36748	9,3289	9,29032
Peneira	Empacot. Ótimo Alfred	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%
25	100	100	100	100	100	100	100	100
19	100	99,05916	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592
9,5	74,0275	65,47694	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769
4,8	54,1972	46,27649	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765
2,4	38,255	40,0072	40,3847	40,7621	41,1396	41,5171	41,8946	42,272
1,2	26,2503	37,00111	37,5328	38,0645	38,5962	39,128	39,6597	40,1914
0,6	17,1594	29,33444	30,0177	30,7009	31,3842	32,0674	32,7506	33,4339
0,3	9,92684	18,89779	19,1165	19,3351	19,5538	19,7725	19,9912	20,2098
0,15	4,33042	9,251745	9,21317	9,17459	9,13601	9,09743	9,05885	9,02027
Peneira	Empacot. Ótimo Alfred	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
25	100	100	100	100	100	100	100	100
19	100	99,05916	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592	99,0592
9,5	74,0275	65,47694	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769	65,4769
4,8	54,1972	46,27649	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765	46,2765
2,4	38,255	42,6495	43,027	43,4044	43,7819	44,1594	44,5369	44,9143
1,2	26,2503	40,72309	41,2548	41,7865	42,3182	42,8499	43,3817	43,9134
0,6	17,1594	34,11711	34,8004	35,4836	36,1668	36,8501	37,5333	38,2165
0,3	9,92684	20,42851	20,6472	20,8659	21,0845	21,3032	21,5219	21,7406
0,15	4,33042	8,981696	8,94312	8,90454	8,86596	8,82738	8,7888	8,75022

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS

Tabela 21 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T₀.

ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778/2005)					
T ₀					
CP	M _{sub}	M _{sss}	M _s	Absorção	Massa Esp.
C1	2147,9	3694,7	3672,5	0,65656	2,367058
C2	2122,7	3636,8	3616,4	0,70264	2,34177
C3	2148,5	3699,3	3674	0,68801	2,263854
C4	2135,6	3673,1	3650,9	0,72626	2,356191
C5	2160	3678,8	3656,6	0,66046	2,356385
C6	2164,6	3690	3667,3	0,65055	2,338526
C7	2067	3578,5	3553,7	0,7321	2,326937
C8	2162,8	3702	3682,1	0,62992	2,347617
C9	2101,4	3637,2	3618	0,6644	2,337831
C10	2116,7	3656	3635,8	0,64688	2,388781
C11	2109,5	3672,1	3653,6	0,51795	2,380145
C12	2106,1	3651,3	3631,4	0,65402	2,374417
C13	2109,2	3643,2	3618,1	0,69542	2,363569
C14	2121,8	3647	3620,6	0,63758	2,384147
C15	2139,3	3649,9	3629	0,53123	2,538322
C16	2111,1	3691,2	3671,9	0,60449	2,408829
C17	2138,8	3701,2	3676,5	0,5641	2,421102
C18	2148,6	3680,8	3661,2	0,68862	2,408391
C19	2118,7	3673,9	3650,6	0,60807	2,409358
P1	2190,3	3817,4	3792,5	0,60712	2,443271
P2	2030,5	3568,7	3543,8	0,61898	2,440474
P3	2036,7	3673,3	3648,2	0,69786	2,390328
P4	2187,4	3827,9	3800,3	0,54045	2,42355
P5	2083	3642,6	3618,7	0,53068	2,385599
P6	2199,6	3867,9	3842,9	0,55559	2,393391
P7	2033	3591,2	3565,1	0,50635	2,366168
P8	2050,4	3594,4	3571,9	0,548	2,380778
P9	2032,7	3575,7	3552,1	0,69373	2,397839
P10	2139	3703	3679,2	0,72916	2,415666
P11	2115,9	3667,9	3649	0,57592	2,436061
P12	2239,2	3893,7	3868,4	0,52561	2,352576
P13	2223,3	3880,6	3853,8	0,67183	2,390908
P14	2249,1	3898,7	3874	0,53534	2,420468
P15	2201,8	3652,4	3633,1	0,63825	2,383054
Média	2130,65	3691,54	3668,62	0,62469	2,385367
Desvio Padrão	56,7261	88,6623	87,7983	0,06777	0,045125

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 22 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T₁₅.

ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778/2005)					
T15					
CP	Msub	Msss	Ms	Absorção	Massa Esp.
C1	2084	3609,6	3589,8	0,54112	2,389795
C2	2105,8	3655,9	3637,1	0,48085	2,372196
C3	2130,2	3671,1	3651,1	0,57616	2,394799
C4	2093,5	3623,4	3601,4	0,53089	2,382025
C5	2135,2	3687	3668	0,53613	2,38676
C6	2106,6	3662,6	3643	0,62135	2,401473
C7	2136,2	3692,7	3672,1	0,48575	2,390814
C8	2122,6	3634,6	3619,4	0,46705	2,375914
C9	2120,6	3669,1	3652,4	0,49046	2,379477
C10	2127,2	3663,5	3644,8	0,57981	2,382796
C11	2094,7	3615,7	3599,1	0,49972	2,375277
C12	2120,3	3659,4	3637,9	0,58133	2,379157
C13	2130,6	3667,9	3649,4	0,686	2,380734
C14	2105,8	3656,1	3637,6	0,64695	2,385583
C15	2101,7	3627	3606,8	0,56999	2,395088
C16	2093,7	3631,6	3614,5	0,55156	2,383982
C17	2114,5	3666,3	3648,7	0,5169	2,375171
C18	2116,2	3651,1	3632,5	0,54778	2,400618
C19	2118,3	3669,2	3651,5	0,61087	2,388355
P1	2181,7	3771,8	3751,5	0,51799	2,393006
P2	2177,4	3782,3	3764,2	0,53802	2,371127
P3	2193,6	3788	3766,3	0,56099	2,390846
P4	2142	3711,5	3691,9	0,41996	2,418092
P5	2124,1	3675,4	3655,8	0,45723	2,384384
P6	2188,4	3773,2	3749,9	0,51306	2,401687
P7	2131,7	3682,2	3664,4	0,46123	2,392382
P8	2107,9	3656,9	3639,9	0,591	2,39714
P9	2222,2	3851,9	3833,1	0,50693	2,402818
P10	2121,9	3677,6	3656,4	0,50858	2,374723
P11	2236,2	3881,5	3862,2	0,56005	2,396386
P12	2143,9	3719,9	3698,4	0,47309	2,37671
P13	2164,3	3757,4	3731,8	0,48236	2,378243
P14	2181,6	3780,4	3756,1	0,51204	2,395634
P15	2238	3864,1	3842,2	0,48473	2,38162
Média	2138,61	3699,64	3680,04	0,53284	2,387417
Desvio Padrão	40,3946	71,2783	70,3804	0,05702	0,010525

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 23 - Medições das massas submersa, saturada com superfície seca e seca para cada corpo de prova do T₂₅.

ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778/2005)					
T25					
CP	Msub	Msss	Ms	Absorção	Massa Esp.
C1	2120	3666,1	3648,5	0,50954	2,412266
C2	2120,4	3655	3636,6	0,53763	2,391598
C3	2145,9	3687,7	3667,6	0,45839	2,346682
C4	2160,2	3724,9	3710	0,43557	2,415029
C5	2159,8	3731,3	3712,9	0,55384	2,430023
C6	2099,5	3626,1	3607,9	0,54861	2,363126
C7	2091,7	3630,8	3613,9	0,40126	2,388824
C8	2117,7	3654,2	3637,4	0,389	2,38046
C9	2120,6	3671,3	3655,5	0,50102	2,404284
C10	2146,6	3712,3	3698,1	0,56686	2,421431
C11	2119,6	3644,1	3626,8	0,49459	2,39131
C12	2123,6	3659,8	3639,4	0,50226	2,38293
C13	2121	3651,2	3635,6	0,47565	2,421907
C14	2098	3613,6	3597,6	0,46096	2,405953
C15	2147,2	3682,2	3662,4	0,50883	2,387091
C16	2108,4	3618,2	3599	0,48239	2,386981
C17	2149,9	3708,1	3693,4	0,50597	2,398496
C18	2091,5	3618,6	3602,6	0,54804	2,410199
C19	2135,5	3669,6	3652,2	0,40162	2,393857
P1	2252	3866,2	3846,6	0,49557	2,390638
P2	2186,2	3777,4	3757,2	0,50445	2,391872
P3	2078,2	3638	3621,4	0,46764	2,37413
P4	2246,5	3850,8	3834,1	0,46187	2,393499
P5	2210,1	3776,4	3755,6	0,43223	2,381588
P6	2187	3812,2	3791,4	0,38398	2,383564
P7	2129,9	3678,2	3663,5	0,477	2,406316
P8	2057,3	3561,4	3547,6	0,56053	2,400976
P9	2261,6	3891,5	3872,1	0,42909	2,40037
P10	2195,4	3761,1	3739,9	0,44474	2,39904
P11	2199,8	3799,6	3780,9	0,54063	2,417107
P12	2114,5	3661,8	3643,5	0,53348	2,414464
P13	2234,1	3823,4	3805,3	0,39801	2,392873
P14	2205,8	3792,1	3774,7	0,44412	2,384091
P15	2181,2	3772,8	3753,7	0,47643	2,407991
Média	2150,49	3708,47	3690,73	0,48062	2,396204
Desvio Padrão	51,44	81,1902	80,3277	0,05155	0,016972

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 24 - Resultados individuais do ensaio de ultrassom para cada corpo de prova.

VELOCIDADE DE ULTRASSOM (NBR 8802/2019)			
CP	T0	T15	T25
C1	4773	4854	4975
C2	4762	4905	5000
C3	4890	5013	5038
C4	4762	5038	5128
C5	4866	4938	4975
C6	4762	5063	5089
C7	4773	4950	4878
C8	4762	5102	4890
C9	4796	4831	5063
C10	4785	4926	5115
C11	4762	5038	4878
C12	4866	4905	5089
C13	4762	4950	4890
C14	4890	5102	5128
C15	4773	5013	5063
C16	4762	4950	4995
C17	4762	4831	4975
C18	4796	4926	5038
C19	4773	4938	5115
P1	4728	4695	4854
P2	4577	4706	4808
P3	4577	4684	4854
P4	4545	4706	4773
P5	4545	4773	4866
P6	4556	4785	4843
P7	4535	4773	4843
P8	4728	4773	4866
P9	4556	4706	4854
P10	4577	4785	4773
P11	4545	4773	4854
P12	4577	4695	4843
P13	4535	4684	4808
P14	4545	4706	4843
P15	4577	4738	4832
Média	4692,25	4860,44118	4936,35294
Desvio Padrão	117,38691	131,41094	112,30261

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 25 - Resultados individuais do ensaio de compressão para cada corpo de prova.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (NBR 9781/2013)			
CP	T0	T15	T25
P1	33,84156	37,51965	40,55329
P2	40,28607	38,58849	36,02641
P3	34,20308	37,59824	38,5099
P4	35,22477	37,44106	38,39987
P5	38,43131	43,63408	41,77931
P6	35,91638	37,3939	39,75165
P7	39,23295	43,69695	39,92455
P8	37,34675	40,47469	43,17825
P9	40,25464	42,72241	38,44703
P10	34,42314	37,97548	39,79881
P11	35,64917	44,08991	44,04275
P12	40,66331	42,97391	38,98145
P13	39,68878	37,77114	37,80258
P14	39,18579	42,14084	37,97548
P15	36,15215	40,16033	43,90129
Média	37,36666	40,27874	39,93817
Desvio Padrão	2,356047	2,579989	2,282316

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 26 - Resultados individuais do ensaio de módulo para cada corpo de prova.

MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE (NBR 8522/2017)			
CP	T0	T15	T25
C1	26,4	29,42	28,441
C2	30,114	26,959	26,756
C3	27,176	23,628	33
C4	23,468	29,985	26,974
C5	28,523	24,098	27,684
C6	27	28,057	25,503
C7	19,849	30,543	31,565
C8	36,713	39,01	22,385
C9	35,966	24,64	34,571
Média	28,357	28,482	28,542
Desvio Padrão	5,101	4,451	3,635

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).