

ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PAVERS FABRICADOS COM RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Thaís Cristina Bastos de Araujo

Filipe Martins Lima

Viviana Possamai Della Sagrillo

Alessandra Savazzini dos Reis

IFES, Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória – ES.

eng.thaisaraujo@outlook.com

filipem_lima@hotmail.com

viviana@ifes.edu.br

alessandrara@ifes.edu.br

Resumo: O estado do Espírito Santo é um dos maiores produtores e exportadores de rochas ornamentais do Brasil. A indústria de rochas gera grande quantidade de resíduo proveniente da extração e do beneficiamento das rochas, denominado de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), que demanda custo e gerenciamento para o seu tratamento, armazenamento e disposição final em aterros. O aproveitamento do RBRO na produção de materiais cimentícios usados na construção civil pode promover melhorias nas propriedades técnicas do produto, tal como, nos pavers, os quais têm sido muito utilizados como pavimento nas grandes cidades. A partir disso, o objetivo desse projeto é analisar o desempenho dos pavers produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais substituindo parcialmente o pó de pedra. Os materiais foram caracterizados fisicamente por meio da granulometria para verificar como a distribuição do tamanho dos grãos pode contribuir com a densificação dos pavers. Quanto ao RBRO, foi feita a caracterização química por FRX, mineralógica por DRX e granulométrica. Foi utilizado um traço de referência 1:0,77:2,33:1,1 (cim:pó de pedra:areia:brita0) com a/c de 0,55. A partir dele foram feitos os traços com o RBRO substituindo o pó de pedra em 10%, 20%, 30% e 40% (massa). Foram fabricados para cada traço 18 pavers com formato Tipo “I” de dimensões (10cmx20cm) com altura de 6 cm. Após a cura, foram submetidos a testes de absorção de água e de resistência à compressão. Os resultados mostram que os materiais caracterizados são adequados ao uso em concreto. Quanto aos pavers, a absorção de água manteve-se dentro do limite especificado de 6% estipulado pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) para os teores de 10% e 20% de RBRO. Quanto à resistência à compressão, os pavers com 20% de RBRO apresentaram os maiores valores. Entretanto, todos os pavers produzidos, inclusive os de referência, não atenderam ao valor mínimo de 35 MPa estabelecido para a resistência mecânica da NBR 9781:2013 (ABNT, 2013). Apesar disso, pode-se concluir que o RBRO promoveu melhoria nos valores de absorção de água e de resistência à compressão em pavers até o teor de 20% de substituição ao pó de pedra.

Palavras-chave: pavers, resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, concreto, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a NBR 9781:2013 (ABNT, 2013), o pavimento intertravado é um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas sem uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

Deste modo, as peças de concreto usadas nos pavimentos, também denominadas “pavers”, são encaixadas entre si no pavimento, distribuindo as tensões e os carregamentos entre as peças, em um comportamento solidário (AGUILAR, 2016).

A utilização dos pisos intertravados vem aumentando junto as cidades, sendo aplicados principalmente em praças, ruas, parques, estacionamento devido à alta resistência mecânica, durabilidade, facilidade de execução, baixo custo de manutenção, reutilização das peças e capacidade de drenagem. Após a execução da pavimentação, a liberação do tráfego de pessoas e veículos é imediata, pois não há necessidade de aguardar o tempo de cura, além de possuir uma diversidade de cores e formatos.

Por outro lado, o estado do Espírito Santo (ES) figura como um dos maiores produtores de rochas ornamentais do Brasil e apresentou em 2021 uma produção de rochas graníticas e mármore de cerca de 3,0 milhões t, segundo a ABIROCHAS (2022). Diante dessa grande produção, o setor de rochas ornamentais gera alta quantidade de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) durante extração e etapas de beneficiamento. Nos processos de corte e polimento das rochas, a quantidade de resíduo pode representar 25% dos blocos de rocha (SANTOS et al., 2013).

O RBRO, se disposto de forma inadequada, pode modificar as características do solo, assorear e aumentar turbidez em corpos hídricos interferindo na biota local; além de desfigurar a paisagem e poder causar danos à saúde humana. A partir disso, uma alternativa sustentável para a indústria de rochas pode ser o aproveitamento do RBRO na composição

de novos materiais, em especial, aos que atendem a construção civil, devido à diversidade e quantidade de produtos consumidos.

Pesquisas tem sido realizadas para verificar o desempenho de materiais cimentícios contendo o RBRO nas propriedades mecânicas e físicas com resultados apresentando melhorias quanto a densificação do material. Nesse sentido, a pesquisa tem como objetivo confeccionar pavers com RBRO em diversos teores substituindo parcialmente o pó de pedra para utilização em pavimento de modo a atender aos requisitos da NBR 9781:2013 (ABNT, 2013).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentação intertravada

De acordo com Godinho (2009), pode-se dizer que a função básica de um pavimento intertravado é a distribuição de cargas concentradas, de maneira a proteger o subleito, fazendo com que sua capacidade de suporte não seja excedida. A estrutura do pavimento intertravado é caracterizada pelo revestimento em peças de concreto com alta durabilidade e resistência, assentados sobre uma camada de areia, base e subleito.

2.2 Tipos de concreto para a fabricação de pavers

Existem dois tipos de concreto que podem ser utilizados para a fabricação de pavers, sendo eles: concreto plástico (convencional) e concreto seco, os quais são detalhados a seguir:

2.2.1 Concreto plástico

Os concretos plásticos, são os concretos usualmente utilizados nas obras de construção civil, caracterizam-se pela facilidade de adensamento e trabalhabilidade, tal fato é possível devido ao elevado consumo de água, o qual ultrapassa a quantidade necessária à hidratação. O excesso de água promove a trabalhabilidade, porém leva a formação de poros na pasta de cimento os quais acarretam a redução da resistência mecânica após o completo endurecimento. Duff Abrams, em 1919, estabeleceu a Lei de Abrams a qual considera que para concretos plásticos, perfeitamente adensados com consistência fixa, as resistências são inversamente proporcionais à relação água/cimento (NEVILLE, 1997).

2.2.2 Concreto seco

Também conhecido por “concreto farofa”, “zero slump” ou ainda “no-slump”, o concreto seco encontra-se no grupo dos concretos especiais e devido a menor quantidade de água utilizada apresenta baixa relação água/materiais secos, elevada consistência e coesão, e ainda, diferencia-se pela forma como o ar aprisionado é retirado. (OLIVEIRA, 2004).

De acordo com Oliveira (2004), ao contrário dos concretos plásticos, os concretos secos não seguem fielmente a “Lei de Abrams”, uma vez que a diminuição da relação a/c não significa aumento da resistência à compressão. No concreto seco, a resistência é proporcional ao grau de compactação que o equipamento proporciona às peças e maiores quantidades de água possuem função lubrificante reduzindo o atrito interno entre os grãos, melhorando a acomodação nos moldes e a compactação da mistura. Assim, para um mesmo traço e energia de compactação, acrescentar água à mistura até a “umidade ótima” promove a redução da porosidade e consequente aumento da resistência.

2.3 O beneficiamento de rochas ornamentais e a geração do RBRO

O resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) é o resíduo gerado na etapa do corte do bloco de rocha em chapas que ocorre nos teares. O corte do bloco no tear “convencional” de lâminas metálicas, gera um resíduo composto por pó de rocha, granalha, partículas da lâmina de aço desgastada, cal e água. E quando o corte ocorre no tear multifios, o resíduo é composto apenas por pó de rocha e água. (MELLO, 2018). Esse resíduo em geral, passa por um filtro prensa para diminuir seu teor de umidade e depois é transportado, disposto em aterros e quando seco, se torna um pó muito fino.

De acordo com Spala (2017), que analisou a caracterização química de amostras de RBRO do estado do Espírito Santo, cerca de 65% das amostras apresentaram o teor de óxido de silício (SiO_2) numa faixa entre 56,4% e 67,8% indicando serem resíduos de rochas silicáticas. Quanto ao teor de óxido de alumínio (Al_2O_3) o autor identificou um teor de cerca de 15% em 82% das amostras.

Em relação a caracterização ambiental do resíduo, de acordo com Buzzi (2008), o RBRO pode ser classificado como não perigoso (Classe II), podendo ser não-inerte (Classe II A) ou inerte (Classe II B), conforme a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004).

2.4 Utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais em materiais cimentícios

Muitos estudos relacionados à utilização dos resíduos provenientes da indústria de rochas em materiais cimentícios vêm sendo realizados no Brasil e no mundo. Nota-se que na maioria dos trabalhos, há a existência de duas tendências

centrais. A primeira consiste na substituição parcial ou total do agregado natural (areia) por RBRO, e a segunda tendência corresponde à substituição parcial do aglomerante cimento Portland pelo RBRO. Além disso, os teores de resíduo que possibilitaram melhorias nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais estiveram próximos de 20%. A Tabela 1 apresenta informações de pesquisas sobre utilização de resíduos de rochas ornamentais em materiais cimentícios, tal como, o RBRO.

Tabela 1. Pesquisas com utilização do resíduo das rochas ornamentais em materiais cimentícios

Autor da pesquisa	Resíduo	Tipo de material estudado	Traço de referência em massa	Teores de substituição	Melhores resultados de propriedades (resistência mecânica e absorção de água)
Teixeira (2021)	RBRO	Concreto	1:2,4:3,28(cimento, areia, brita)	Cimento por RBRO em 5%, 7,5% e 10%	Resistência à compressão: 7,5% de substituição alcançando resistência superior ao traço referência
Cardoso <i>et al.</i> (2021)	Resíduo de corte de mármore e granito (RCMG)	Pavers	1:0,8:1,7 (cimento, areia, brita)	Cimento por RCMG em 5%, 10%, 15% e 20%	Resistência à compressão: 20% de substituição atendeu NBR 9781 (35MPa). Absorção da água: 20%, com resultados oscilando entre 0,45% e 1% de absorção de água.
Junior (2021)	Pó de mármore	Pavers	1:1,93:0,64:0,91:2,11 (cimento: areia natural: areia artificial: brita 0: brita 1)	Areia por pó de mármore em 15% 25%	Resistência a compressão: 25% de substituição alcançando 37,96 MPa. Absorção da água: 25% de resíduo obteve absorção de 0,48%.
Teixeira <i>et al.</i> (2020)	RBRO	Concreto estrutural	1:2,4:3,28:0,60 (cimento, areia, brita, a/c)	Cimento por RBRO em 5%, 7,5%, 10% e 12,5%	Resistência à compressão: 7,5% do resíduo (29,96MPa). Absorção da água por capilaridade: 7,5% de resíduo (redução de 10%). Absorção da água por imersão: 7,5% de substituição (reduziu absorção em 3,66% em relação ao traço de referência)
Jain et al. (2020)	Resíduos de granito (GW)	Concreto Autoadensável	1:1,54:1,45:0,37 (cimento, areia, brita, a/c)	Areia por GW em 20%, 40%, 60% e 80%	Melhor resultado com 40% de substituição para os ensaios de densidade, absorção, resistência à compressão e flexão
Azevedo <i>et al.</i> (2020)	RBRO	Argamassa de revestimentos	1:1:6 (cimento, cal hidratada, areia)	Areia por RBRO em 20%, 40%, 60% e 80% e 100%	Argamassa com 40% de resíduo apresentou maior deformação plástica, auxiliando na sua aplicabilidade apresentando também propriedades tecnológicas aprimoradas no estado fresco.
Rodrigues (2019)	RBRO	Concreto Autoadensável	1:1,15:1,80:0,41 (cimento, areia, brita, a/c)	Cimento por RBRO em 10%, 15%, 20%	Resistência à compressão: 30%, alcançado 39,4 MPa (com uso de superplastificante Powerflow). Resistência à flexão: 20% de RBRO (7,59 MPa).
Mittri <i>et al.</i> (2018)	RBRO	Concreto	1:1,3:2,22:0,4 (cimento, areia, brita, a/c)	Adição do RBRO em 5% e 10%	Resistência mecânica: 10% proporcionou um aumento de 14,18% na resistência.
Sato <i>et al.</i> (2018)	RBRO	Pasta cimentícia	Três relações a/c diferentes utilizadas (0,45; 0,55; 0,65)	Adição do RBRO 0%, 5%, 10%, 15%	Melhor resultado com 5% de adição do RBRO. Caracterização do resíduo: finura e massa específica próximas do cimento, com baixa reatividade, podendo ser utilizado como adição mineral inerte na matriz cimentícia. Caracterização reológica: a pasta se comportou como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico.
Mashaly <i>et al.</i> (2015)	Lodo proveniente do beneficiamento do mármore.	Pavers	1: 2,0: 3,37: 0,48 (cimento: areia: pedrisco: água).	Substituição de 10%, 20%, 30% e 40% da massa de cimento por resíduo de mármore	Resistência à compressão: 20% de resíduo (36,6MPa comparado a 33,4MPa do concreto de referência). Resistência à flexão: 20% de resíduo (4,38MPa comparado a 3,61MPa do concreto de referência). Absorção de água: 20% de resíduo (7,8% comparado a 8,07% do concreto de referência). Resistência à abrasão: 20% de resíduo (0,09cm ³ /cm ² de desgaste superficial e 0,11cm ³ /cm ² do concreto de referência).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), esse tipo de cimento desenvolve resistência mais rapidamente devido ao teor mais elevado de silicato tri-cálcico – C_3S (mais alto do que 55%, chegando à 70%) e à maior finura dos grãos, resultado de uma moagem mais intensa (NEVILLE, 1997). De acordo com Fernandes (2016), as peças pré-fabricadas produzidas com CP V ARI podem ser manuseadas após 24 h da fabricação, além de apresentarem menores índices de quebra durante a fase de paletização, devido à alta resistência mecânica obtida nos primeiros sete dias, o que pode ser uma realidade para os pavers. Considerando isso, foi utilizado o CP V ARI para a produção dos pavers.

3.1.2 Areia

A areia foi adquirida em uma empresa regional. Trata-se de areia natural, média, extraída no Rio Doce em Colatina-ES.

3.1.3 Pó de pedra

O pó de pedra, também foi adquirido em uma empresa regional, extraído da Pedreira Polimix-Serra-ES. O pó de pedra é considerado agregado artificial, pois o material é obtido a partir da fragmentação industrial das rochas compactas em jazidas. Fernandes (2016) afirma que o uso do pó de pedra é importante, por apresentar ao mesmo tempo, grãos finos que fornecem coesão à mistura, grãos médios que dão volume à argamassa, os quais contribuem com a resistência da peça. O autor afirma ainda que quando a quantidade de finos no pó de pedra é balanceada, o mesmo atua como “areia artificial” que se combina com o pedrisco ou com a areia grossa, ajudando a se ter uma curva granulométrica ideal para a produção de blocos e pavers.

3.1.4 Pedrisco

O agregado graúdo empregado foi o pedrisco, também conhecido no mercado como brita nº 0 (B-0). Sua origem também remete à Pedreira Polimix, unidade de Serra-ES.

3.1.5 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

O RBRO foi doado por uma empresa regional beneficiadora de rochas ornamentais localizada em Ibiracu-ES.

3.2 Métodos

A metodologia utilizada na pesquisa para escolha do traço e moldagem dos pavers foi baseada nos trabalhos de Bittencourt (2012), Penteado, Carvalho e Lintz (2016) e de Araujo (2019), que estudaram pavers produzidos com diferentes resíduos.

3.2.1 Definição dos teores de substituição

Após análise dos estudos de Penteado, Carvalho e Lintz (2016) e de Araujo (2019) foi adotada dosagem de referência para confecção dos pavers (1 : 0,77 : 2,33 : 1,1 : 0,55), e a partir dela, o pó de pedra, foi substituído pelo resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais nos teores 10%, 20%, 30% e 40% (massa) conforme apresentado da Tabela 2.

Tabela 2. Traços para fabricação dos pavers

Traço	Cimento (kg)	Pó de pedra (kg)	Pedrisco (kg)	Areia (kg)	RBRO (kg)	Água (L)	Relação a/c
Referência	0,5	1,165	0,55	0,385	0	0,275	0,55
10%	0,5	1,048	0,55	0,385	0,116	0,275	0,55
20%	0,5	0,932	0,55	0,385	0,233	0,275	0,55
30%	0,5	0,815	0,55	0,385	0,349	0,275	0,55
40%	0,5	0,699	0,55	0,385	0,466	0,275	0,55

3.2.2 Análise granulométrica

As composições granulométricas dos materiais foram determinadas por meio do ensaio de peneiramento mecânico obedecendo às normas NBR NM 248:2003 (ABNT,2003) e NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)¹. O ensaio se resume em colocar uma amostra de material pré-estabelecida sobre um conjunto de peneiras e agitá-las mecânica ou manualmente durante um tempo pré-determinado para permitir a separação dos diferentes tamanhos de grãos. Após a agitação, a massa retida em cada peneira é verificada. Para os agregados miúdos foram ensaiadas duas amostras secas de massa inicial igual a 300 g e para o agregado graúdo duas amostras secas de 1,5kg.

3.2.3 Análise mineralógica (DRX)

A análise mineralógica do RBRO foi realizada pelo ensaio de Difração de Raios X (DRX), em um Difrátômetro Bruker -D8 com goniômetro theta-theta com radiação $K\alpha$ em tubo de cobre nas condições de 40kV e 40mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro foram de 4 segundos para 0,02° do goniômetro de 4° a 72° 2 theta, respectivamente. A quantificação das fases cristalinas identificadas na amostra foi realizada pelo Método de Rietveld com GOF=3.02 e Rwp=22.98.

3.2.4 Análise química (FRX)

A análise química quantitativa do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), em equipamento PANalytical, modelo AxiosMax, com tubo de 4 kW e alvo de ródio.

3.2.5 Determinação da absorção da água

A determinação da absorção de água seguiu o procedimento descrito na ABNT NBR 9781:2013 (ABNT, 2013). Os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 24 h, em seguida foram pesados cada corpo de prova na condição saturada. Após isso, os pavers foram levados à estufa com temperatura a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, mantendo esta condição por 24h, e em seguida foi feita a pesagem dos corpos de prova em condição seca. O valor de absorção da água (A) foi calculado conforme a Eq. (1):

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

onde: A=absorção de água (%); m_2 = massa imersa; m_1 = massa seca

A Figura 1 apresenta as etapas do ensaio de absorção de água, Figura (a) pavers sendo submersos para a pesagem saturada, Figura (b) demonstração da pesagem saturada, Figura (c) pavers sendo colocados em estufa para a posterior pesagem seca.

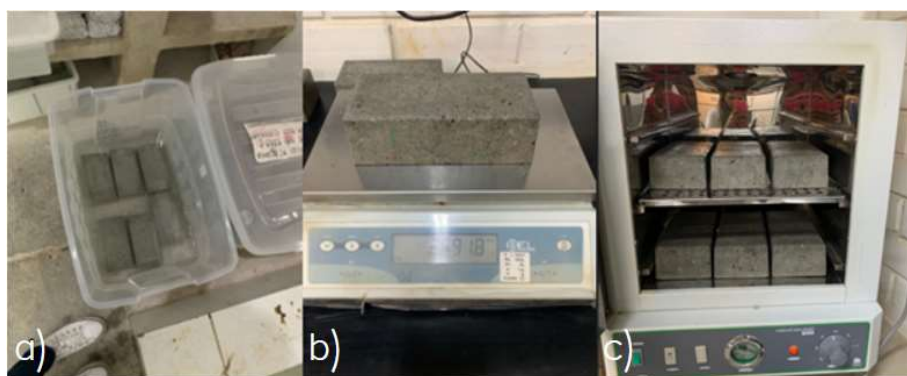


Figura 1. Ensaio de absorção da água nos pavers

3.2.6 Determinação da Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão seguiu o procedimento descrito na NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) Anexo A. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em prensa hidráulica servo controlada marca EMIC modelo PC300.

¹ A NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) foi atualizada em 2022, após a execução e análise do ensaio de granulometria.

As amostras foram saturadas em água a $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ por 24 horas antes do ensaio. A máquina aplicou um carregamento contínuo, com velocidade de 550KPa/s até a ruptura completa do bloco.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise granulométrica

4.1.1 Análise granulométrica da areia

A curva granulométrica obtida para a areia, e os limites aceitáveis e ótimos de utilização propostos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), são apresentados na Fig. 2.

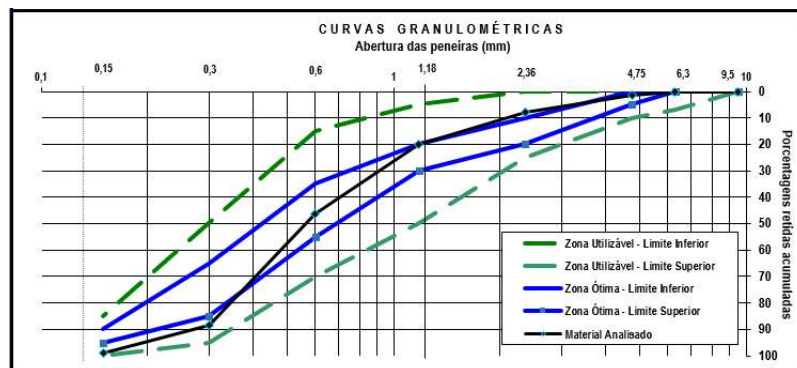


Figura 2. Curva Granulométrica da Areia

A areia possui módulo de finura igual a 2,63. A dimensão máxima característica é 4,75 mm. Segundo a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), a areia se situa na “zona ótima de limites inferiores” para agregados miúdos, que compreende valores do módulo de finura entre 2,20 e 2,90. Dessa maneira, a areia natural utilizada no trabalho se enquadra na zona ótima de limites inferiores, ideal para concreto.

4.1.2 Análise granulométrica do pó de pedra

A curva granulométrica obtida para o pó de pedra, e os limites aceitáveis e ótimos de utilização propostos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), são apresentados na Fig. 3.

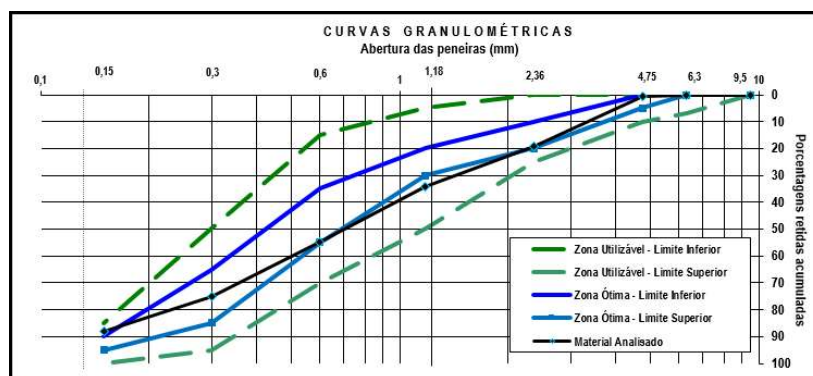


Figura 3. Curva Granulométrica do pó de pedra

O pó de pedra possui módulo de finura igual a 2,72. A dimensão máxima característica é 4,75 mm. Ainda de acordo com a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), o módulo de finura do pó de pedra se enquadra na “zona ótima de limites superiores” (módulo de finura de 2,20 a 2,90). Pode-se verificar uma maior quantidade de finos, se comparado a areia, visto que a soma da porcentagem de grãos do pó de pedra passantes na peneira ABNT 0,15 mm é de cerca de 12% da massa total, enquanto na areia esse valor é 0,8%.

4.1.3 Análise granulométrica do RBRO

A curva granulométrica obtida para o RBRO, e os limites aceitáveis e ótimos de utilização propostos pela ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), são apresentados na Fig. 4.

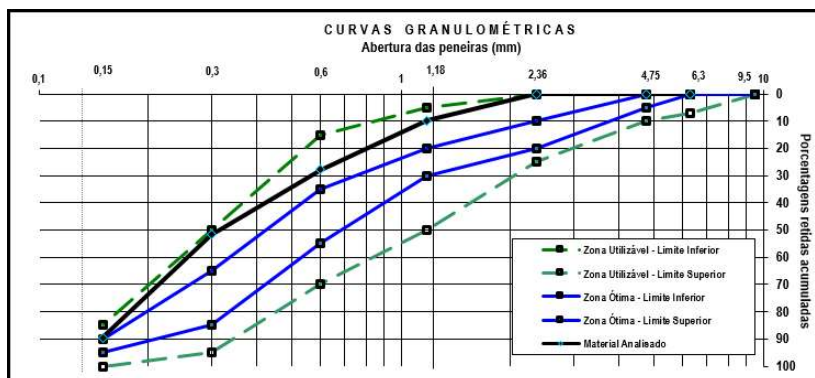


Figura 4. Curva Granulométrica do RBRO

O RBRO possui módulo de finura igual a 1,79. A dimensão máxima característica é 2,36 mm. De acordo com a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), o módulo de finura do RBRO se enquadra na “zona utilizável de limites inferiores”. Sendo assim, a partir nas análises da distribuição granulométrica pode-se verificar que o RBRO é mais fino que a areia, visto que 10,5% da amostra de RBRO passaram na peneira ABNT 0,15 mm, se comparado com a areia que passou 0,8%. Por ser mais fino, o resíduo contribui principalmente para preencher os vazios existentes entre os grãos da areia e do pedrisco, aumentando a compactidade, o que pode diminuir a absorção de água gerando melhoria de resistência mecânica. Observa-se também que o RBRO apresenta porcentagem de grãos finos (10,5%) muito próxima do pó de pedra (12%), que foi substituído nessa pesquisa.

4.1.4 Análise granulométrica do pedrisco

A curva granulométrica obtida para o pedrisco, e os limites aceitáveis e ótimos de utilização propostos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), são apresentados na Fig. 5.

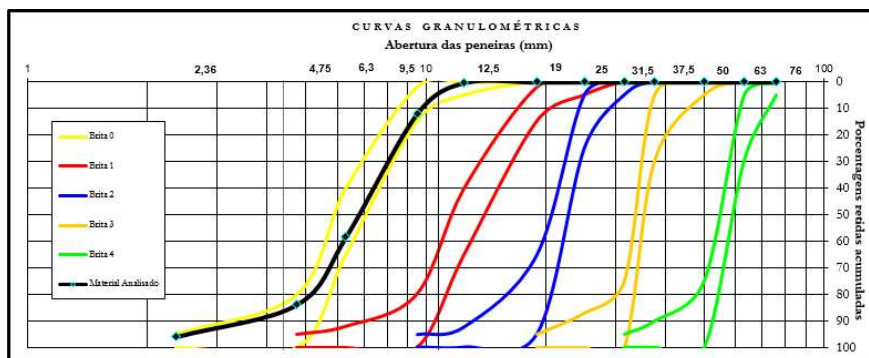


Figura 5. Curva Granulométrica do pedrisco

O pedrisco possui módulo de finura igual a 2,88. A dimensão máxima característica é 12,5 mm. A zona pertencente é a “zona granulométrica 4,75/12,5”. Verificando a Fig. 5 pode se analisar que o pedrisco se classifica como brita 0 sendo adequado para o uso de concreto.

4.2 Análise Química do RBRO

Na Tabela 3 é apresentada a composição química do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, obtida pela técnica de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 3. Resultado da Análise química por espectrometria de FRX

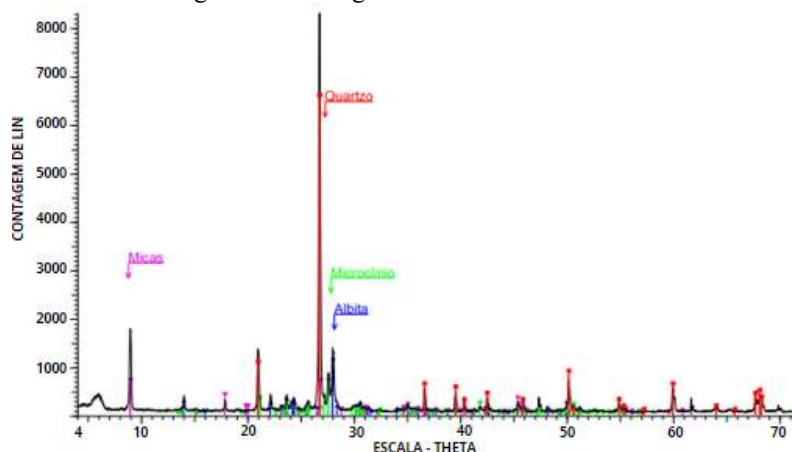
Elementos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	Perda ao fogo
Resultado %	11,241	0,922	1,183	3,085	0,397	0,053	2,970	0,154	78,349	0,206	<0,05	<0,05	0,072	1,439

A partir dos resultados da fluorescência de raios-X constata-se a predominância da sílica (SiO₂) e, secundariamente, do feldspato alumina (Al₂O₃), o que evidencia ser o resíduo sílico-aluminoso. Corroborando com os estudos de Sato (2018) que também encontrou predominância no composto quartzo sílica (SiO₂) e por feldspato alumina (Al₂O₃) sendo, 66,80% e 13,5% respectivamente. Assim como ocorreu na pesquisa de Azevedo et al. (2020) que também encontrou predominância no composto quartzo sílica (SiO₂) e feldspato alumina (Al₂O₃), sendo 63,23%, 67,91%, respectivamente. Em menores teores há presença de minerais do grupo das micas (K₂O e Na₂O), compostos estes presentes em rochas graníticas que dão origem ao resíduo. Quanto à perda ao fogo, o valor encontrado pode ser referente aos materiais provenientes do polimento, já que a amostra de resíduo estudada possui tanto a lama proveniente do corte dos blocos quanto à lama do polimento das chapas.

4.3 Análise Mineralógica do RBRO

A análise mineralógica do RBRO é apresentada na Fig. 6.

Figura 6. Difratograma de raios X no RBRO.



Analisando os resultados obtidos a partir do DRX, verifica-se que o RBRO utilizado é constituído principalmente por quartzo (Q) e albita (A). Podem ser observados, também, picos menos intensos de microclínio (M) e micas (B).

Assim como ocorreu no trabalho de Teixeira (2021) que ao verificar a análise mineralógica do RBRO também constatou que o resíduo é constituído principalmente por quartzo e albita. Visto que o material apresenta um pico cristalino referente ao quartzo (SiO₂) bem definido e há ausência de halo amorfo sugere-se ser um material não-pozolânico. Assim, ao utilizar o RBRO na mistura do concreto de cimento Portland, sua principal atuação deverá ser como filer, gerando diversos pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea (TEIXEIRA, 2021). Com isso, poderá contribuir com a densificação do material resultando em diminuição da absorção de água.

4.4 Absorção da água

A Tabela 4 apresenta os resultados da absorção da água dos pavers produzidos com teores de resíduo variando de 0% a 50%.

Tabela 4. Resultados de absorção de água

Corpo de Prova	Absorção de água (%)				
	Traço 0%	Traço 10%	Traço 20%	Traço 30%	Traço 40%
cp1	4,93	5,14	4,99	6,25	7,28
cp2	4,91	5,06	5,47	6,28	7,07
cp3	4,99	5,03	5,13	6,26	7,46
cp4	4,79	5,07	5,09	6,09	6,91
cp5	4,60	4,96	5,02	5,87	7,01

cp6	4,65	5,10	5,13	5,83	6,74
Absorção média	4,81	5,06	5,14	6,09	7,08

O pavers fabricados com teor de 10% e 20% de teor de RBRO obedeceram ao valor estipulado pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013), mesmo tendo apresentado uma pequena variação em relação ao traço de referência de 0,25% e 0,33%, respectivamente. Já, os pavers com teor de 30% de RBRO alcançaram uma média de 6,09% excedendo apenas em menos de 0,09% do valor máximo de 6%.

Observa-se ainda que os pavers com 40% de RBRO excederam o valor máximo exigido pela norma. A média para os 6 blocos foi de 7,08% excedendo 1,08% do valor ordenado pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013), sendo que todos os pavers com o traço com 40% de RBRO excederam o valor mínimo de absorção exigido pela norma, alcançando a maior absorção de todos traços estudados.

Pode-se verificar que os valores da absorção da água aumentaram em função da incorporação do RBRO nos pavers. Assim como ocorreu na pesquisa de Cardoso et al. (2021) onde foi verificado um aumento na absorção da água de 60% nos corpos de prova com 20% de RBRO quando comparado ao sem resíduo. Em Soares (2014) também houve um aumento de 9,8% na absorção da água nos concretos com RBRO, atribuído à dificuldade de adensamento e consequente incorporação de ar, principalmente nos concretos com 15% de RBRO.

4.5 Resistência à compressão

A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias realizado nos pavers.

Tabela 5. Resistência à compressão dos pavers

cp	Resistências individuais (f _{pi}) em MPa				
	0% RBRO	10% RBRO	20% RBRO	30% RBRO	40% RBRO
1	15,75	18,84	18,02	15,39	7,46
2	22,78	19,02	20,19	19,05	6,47
3	20,76	20,33	20,62	15,14	7,25
4	20,39	15,57	19,55	17,10	7,04
5	22,22	14,54	19,76	19,87	n.d
6	19,94	20,19	18,48	20,01	9,87
f_p	20,30	18,08	19,44	17,76	7,62
S	2,49	2,44	1,00	2,20	1,31
f_{pk}	18,01	15,83	18,52	15,74	6,41

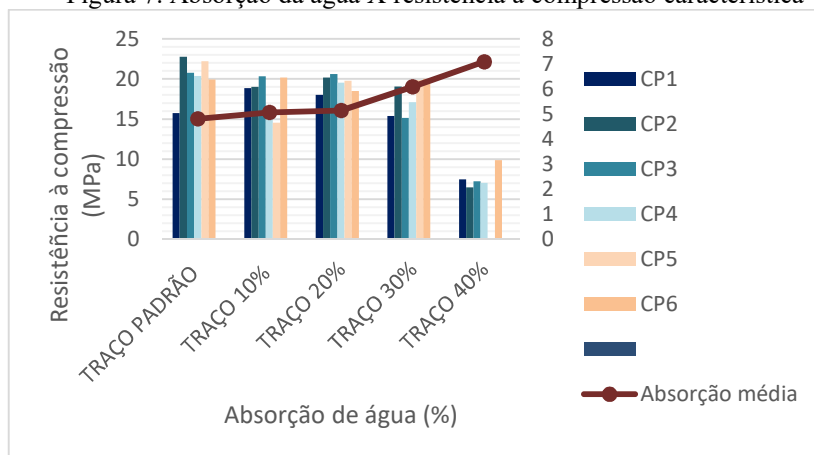
Nota: cp = corpo de prova; f_p = resistência característica à compressão; s = desvio padrão; f_{pk} = resistência característica estimada à compressão; n.d = não determinado devido à problemas no equipamento.

Analisando a Tabela 5, pode-se dizer que os pavers com 20% de RBRO apresentaram os maiores valores de resistência à compressão de 19,44 MPa, inclusive sendo maiores que os pavers com 0% de RBRO. Até o teor de 20%, o resíduo deve ter funcionado com um filer colmatando os vazios existentes no concreto; e com o aumento do teor do RBRO, ocasionou um excesso de finos, que demanda água e prejudica a trabalhabilidade, se sobrepondo ao efeito físico proporcionado inicialmente. O que resulta em aumento de absorção de água e diminuição na resistência à compressão.

Ademais, todos os pavers produzidos, inclusive os de referência, não atenderam ao valor mínimo de 35 MPa estabelecido como mínimo para a resistência mecânica na NBR 9781:2013 (ABNT, 2013).

A Figura 7, apresenta uma análise entre os valores absorção da água e da resistência característica estimada à compressão dos pavers.

Figura 7. Absorção da água X resistência à compressão característica



Pode-se notar que com o aumento dos valores de absorção da água, ocorre a diminuição dos valores da resistência à compressão, o que se mostra muito significativo para o traço com 40% de RBRO.

Acredita-se que a diminuição da absorção de água esteja diretamente relacionada ao melhor empacotamento de partículas proporcionado pela parcela de finos presente no RBRO, o que ocorreu até o teor de 20%. Assim, o concreto apresenta uma microestrutura mais compacta promovida pelo efeito filler do resíduo, se traduzindo em um menor volume de vazios a serem ocupados pela água, e consequentemente, em menores valores de absorção de água (LEAL, 2018).

5. CONCLUSÕES

Pelo que se depara com os resultados alcançados e analisados, conclui-se que a granulometria dos agregados é adequada para o uso em peças de concreto. Além disso, a incorporação do RBRO contribui para um melhor empacotamento de partículas entre os materiais utilizados, diminuindo os vazios entre a areia e o pedrisco. Os traços com 10% e 20% de teor do RBRO atenderam aos requisitos exigidos pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) quanto a absorção da água, sendo que o teor de 20% se mostrou como o teor ideal de resíduo para utilização na composição dos pavers em comparação com o traço de referência adotado na pesquisa.

Quanto à resistência à compressão, todos os pavers produzidos não alcançaram o valor mínimo exigido pela NBR de 35 MPa, sendo que, o traço com 20% de RBRO apresentou o melhor desempenho, alcançando uma média de 18,52 MPa. Assim, pode-se sugerir que o RBRO esteja promovendo melhoria nos valores de absorção de água e de resistência à compressão em pavers até o teor de 20% de substituição ao pó de pedra considerando os traços analisados. Ademais, a partir da grande utilização dos pavers em pavimentação das cidades, o aproveitamento do RBRO pode contribuir para a sustentabilidade dos setores das rochas ornamentais e da construção civil, além de aumentar vida útil dos aterros onde em geral o RBRO é disposto.

6. AGRADECIMENTOS

Ao IFES - Campus Vitória, seus servidores, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e seus professores que me ajudaram nesse projeto e à FAPES pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

Abirochas. 2022. Balanço das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021. Informe 01/2022.

Aguilar, G. S. *Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente: contribuição para o estudo de viabilidade técnica*. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Araujo, T. C. B.; Saly, C. R. S.; Patricio, J. P.; Lopes, P. S. Avaliação da resistência à compressão e índice de absorção de água de pavers intertravados produzidos com lama abrasiva. Trabalho de conclusão de curso (Graduação), Faculdade Integradas de Aracruz, Aracruz, 2019.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 10004:2004. *Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7211:2009. *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 9781:2013. *Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 248:2003. *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- Azevedo, A.R.G.; Marvila, M. T.; Barroso, L. S.; Zanelato, E. B.; Alexandre, J.; Xavier, G.C.; Monteiro, S. N. *Effect of Granite Residue Incorporation on the Behavior of Mortars*. Materials (Basel), 2020.
- Bittencourt, S. F. *Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição*. Dissertação (Mestrado) - Tecnologia e Inovação, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.
- Cardoso, W., Colombo Baptista, R., Augusto Pires Machado, T., Gustavo de Sousa Galdino, A., & di Felice, R. (2021). *Avaliação Da Incorporação De Resíduo De Corte De Mármore E Granito Em Concreto Para Produção De Pisos Intertravados Para Pavimentação*. Revista Ifes Ciência , 7(1), 01-17.
- Fernandes, I. *Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade*. 7 ed. Ribeirão Preto, Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.
- Godinho, D, P. *Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade / Dalter Pacheco Godinho - 2009. 157f* Dissertação (Mestrado Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- Jain, A., Gupta, R., Chaudhary, S. *Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash*. Construction and Building Materials, v. 262, pp. 120516, 2020.
- Júnior, G. S. *O efeito filler em blocos de pavimentação com uso do pó de mármore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.
- LEAL, C. E. F. *Peças para pavimento intertravado de concreto: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2018.
- Mashaly, A. O.; El-Kaliouby, B. A.; Shalaby, B. N.; El-Gohaly, A. M.; Rashwan, M. A. *Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks*. Journal of Cleaner Production, v. 112. 2015. p. 731-741.
- Mello, R. Z. *Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2018.
- Rodrigues, M. A.; Filho, J. A. M. *Fabricação de concreto autoadensável com utilização de resíduos de marmorarias como adição mineral*. REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 15(1). (2019).
- Mittri, S. H. M.; Vieira, G. L.; Guignone, G. C.; Degen, M. K.; Teles, C.R.; Zulcão, R. *Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration*. Construction and Building Materials. V. 188 (2018).
- Neville, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- Oliveira, A. L. *Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação*. 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- Penteado, C. S. G.; Carvalho, E. Viviane de; Lintz, R. C. C. Lafhaj, Z. *Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing*. Journal of Cleaner Production, v. 112. 2016. p. 514-520
- Santos, Max M. Aguiar; Destefani, A.Z.; Holanda, J.N.F.. *Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento*. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 18, n. 4, p. 1442-1450, Dec. 2013 .
- Sato, V. Y., Galina, A. P. L. e Teixeira, J. E. S. L. *Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais [online]. 2018, v. 11, n. 06, pp. 1284-130.
- Spala, S. T.; Castro, N. F.; Queiroz, F. C.; Freire, L. C. *Caracterização tecnológica de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais para seu uso em concreto*. XXV Jornada de Iniciação Científica e I Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. CETEM/MCTIC, 2017.
- Teixeira, F. R.; F. C. Magalhães, F. C.; Wally, G. B.; Sell Jr, F. K.; Paliga, C. M.; Torres, A. S. *Uso do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial ao aglomerante na produção de concretos estruturais*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 13, 3, p. 501 – 514 (2020).
- Teixeira, F. R. et al. *Avaliação de propriedades relacionadas à penetração de cloretos em concretos produzidos com substituição parcial de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais*. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2021, v. 26, n. 03
- Soares, R.B. “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF WATER ABSORPTION AND COMPRESSION RESISTANCE IN PAVERS MANUFACTURED WITH RESIDUE FROM ORNAMENTAL ROCK PROCESSING

Thais Cristina Bastos de Araujo
Filipe Martins Lima
Viviana Possamai Della Sagrillo
Alessandra Savazzini dos Reis
IFES, Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória – ES.
eng.thaisaraujo@outlook.com
filipem_lima@hotmail.com
viviana@ifes.edu.br
alessandrar@ifes.edu.br

Abstract: The state of Espírito Santo is one of the largest producers and exporters of ornamental stones in Brazil. The stone industry generates a large amount of waste from the heritage and processing of rocks, called ornamental stone processing waste (RBRO), which requires cost and management for its treatment, storage and final disposal in landfills. The use of RBRO in the production of cementitious materials used in civil construction can promote improvements in the technical properties of the product, such as in pavers, which have been widely used as pavements in large cities. From this, the objective of this project is to analyze the performance of pavers produced with waste from ornamental stone processing, partially replacing stone dust. The materials were physically characterized by means of granulometry to verify how the grain size distribution can contribute to the densification of the pavers. As for the RBRO, chemical characterization was carried out by FRX, mineralogical by DRX, granulometric. A reference mix of 1:0.77:2.33:1.1 (cim:stone powder:sand:gravel0) with a/c of 0.55 was used. From it, traces were made with RBRO replacing stone dust at 10%, 20%, 30%, 40% and 50% (mass). 18 pavers with Type "I" format of dimensions (10cmx20cm) with a height of 6 cm were manufactured for each line. After curing, the testicles of water absorption and resistance to resistance were manifested. The results show that the characterized materials are suitable for use in concrete. As for pavers, water absorption remained within the specified limit of 6% stipulated by NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) for 10% and 20% RBRO contents. As for resistance to resistance, pavers with 20% RBRO showed the highest values. However, all pavers produced, including the reference ones, did not meet the minimum value of 35 MPa established for the mechanical strength of NBR 9781: 2013 (ABNT, 2013). Despite this, it can be concluded that RBRO promoted improvement in water absorption values and resistance to resistance in pavers up to the content of 20% replacement of stone dust.

Keywords: pavers, ornamental stone processing residue, concrete, sustainability.

RESPONSIBILITY FOR INFORMATION

The authors are solely responsible for the information included in this work.