

Influência da composição de agregado miúdo de rio e proveniente do processo de britagem em argamassas autoadensáveis

Influence of river and crushing aggregates composition in self-compacting mortars

Geraldo Luís Becker Duarte¹, Bruno José da Silva¹,
Ben-Hur Raíra Martins¹, Juliana Machado Casali¹, Andrea Murillo Betioli¹

¹Departamento Acadêmico de Construção Civil, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Av. Mauro Ramos, 950, Centro, CEP: 88020-300, Florianópolis, SC, Brasil.
e-mail: geraldobduarte@gmail.com, brunojossilva@gmail.com, benhur.r.martins@gmail.com, juliana.casali@ifsc.edu.br, andrea.betioli@ifsc.edu.br

RESUMO

O presente artigo teve como objetivo o estudo de argamassa autoadensável com composições de agregado miúdo (areia de rio e areia de britagem) com intuito de reduzir o consumo de areia natural de rio, uma vez que a mesma gera um impacto devido a sua extração. No estado fresco, as argamassas produzidas foram avaliadas quanto à densidade de massa, teor de ar incorporado, fluidez e análise de borda. No estado endurecido foram determinadas as resistências à tração e à compressão; o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade de massa aparente. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a substituição de areia natural de rio por areia de britagem diminuiu a demanda de água nas argamassas autoadensáveis, resultando num aumento do consumo de cimento Portland por m³, em um menor volume de pasta para a mesma fluidez, isso devido ao maior módulo de finura da areia de britagem e melhor empacotamento em função da granulometria mais contínua. Com a diminuição da relação água/cimento houve um aumento dos valores de resistência à compressão e à tração e do módulo dinâmico, obtendo valores acima do mínimo exigido por norma. Como o consumo de cimento Portland por m³ também aumentou, evidencia-se a possibilidade de ajuste na composição reduzindo o seu consumo para uma dada resistência. Assim, com o aumento do teor de areia de britagem e de cimento Portland, as argamassas obtiveram um menor índice de intensidade de ligante, assim mais eficientes.

Palavras-chave: argamassa autoadensável, autonivelante, areia de britagem, areia de rio.

ABSTRACT

This article aimed to study self-compacting mortar with fine aggregate compositions (river sand and crushed sand) in order to reduce the consumption of natural river sand, since it generates an impact due to its extraction. In the fresh state, the mortars produced were evaluated for specific gravity, air entrained content, fluidity and appearance (surface finish). In the hardened state were also determined the tensile and compressive strengths; elasticity modulus and specific gravity. From the results obtained, it was concluded that the replacement of natural river sand by crushing sand reduced the water demand in self-compacting mortars (higher cement consumption), resulting in a lower volume of paste for the same fluidity, due to the greater fineness modulus of sand from crushing and better packing due to more continuous granulometry. The decrease in the water-cement ratio resulting in an increase in the compressive strength, tensile strength and the elasticity modulus, obtaining values above the minimum required by standard specification. However, as the consumption coefficient of Portland cement has also increased, the possibility of adjusting the composition is evident, reducing the consumption coefficient of Portland cement for a given strength. With the increase in the crushing sand and Portland cement content, the mixtures obtained a lower binder intensity index, more efficient.

Keywords: self-compacting mortar, self-leveling mortar, crushed sand, river sand.

1. INTRODUÇÃO

A argamassa autoadensável ou autonivelante é caracterizada por ser uma mistura cimentícia de elevada fluidez. A aplicação desta argamassa em obras quando comparada ao contrapiso convencional (argamassa seca) é caracterizada pela elevada produtividade, redução da mão de obra e do tempo de aplicação [1].

A falta de normatização e de um método de dosagem para argamassa autoadensável ainda é um

desafio para o meio acadêmico e setor produtivo. RIZWAN e BIER [2] enfatizam a necessidade de uma proporção adequada dos materiais, uma vez que o teor adequado de finos pode reduzir o consumo de cimento Portland, a demanda de água e o calor de hidratação, aprimorando o empacotamento e a microestrutura das argamassas autoadensáveis.

A presença de finos (abaixo da 0,075 mm) em argamassas autoadensáveis auxiliam na fluidez pela melhor “lubrificação” da estrutura de empacotamento dos grãos [3] e proporcionam estruturas compactas, resultando em menor consumo de cimento [4]. No entanto, as areias de britagem comerciais são geralmente lavadas, perdendo grande parcela destes finos, que normalmente são suprimidas pela adição de finos ou aumento no consumo de cimento Portland para obter uma fluidez adequada. Uma forma de contornar esta situação seria o uso de areia de britagem não lavada (pó de pedra), resíduo oriundo do processo de britagem de rochas para obtenção de britas.

MENOSSEI [5] comenta que o reaproveitamento dos finos provenientes do processo de britagem (pó de pedra, isto é, areia de britagem não beneficiada) não é algo novo, que desde a década de 80 os países desenvolvidos como Estados Unidos estudaram e a empregaram em suas obras. ANDRIOLO [6] cita que o pó de pedra no Brasil começou a ser utilizado em meados da década de 80 na construção da hidrelétrica de Itaipu, que na época gerou vantagens técnicas e econômicas.

A produção bruta de areia no Brasil em 2010, segundo o Anuário Mineral Brasileiro do Departamento Nacional de Produção Mineral [7], foi de 271.763.068 toneladas, sendo 265.227.323 toneladas (97,6%) de areia proveniente da extração de leito de rios e 6.535.745 toneladas (2,4%) advindos do processo de britagem. Devido ao impacto ambiental causado pela extração de areia natural de leitos de rios, além da dificuldade e custo de transporte deste material para centros urbanos, o uso de areia natural de britagem faz-se cada vez mais necessário, apesar de seu uso ainda incipiente.

Conforme mencionado por HICKEL *et al.* [8], os agregados de britagem apresentam problemas com relação à forma dos grãos, alertando que, além da distribuição granulométrica, a forma das partículas também deve ser considerada. Segundo TUTIKIAN e DAL MOLIN [9], agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas são preferíveis para produção de argamassas autoadensáveis porque aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água. Quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, maior será a viscosidade das argamassas, dificultando a fluidez, ou, segundo METHA e MONTEIRO [10], poderão exigir maior quantidade de pasta de cimento Portland para uma mesma trabalhabilidade. Segundo estes mesmos autores, os agregados formados por atrito geram partículas arredondadas, que são os casos de areias naturais de depósitos eólicos ou de rios. Por outro lado, areias artificiais, oriundas de britagem, apresentam vértices e arestas bem definidos, sendo consideradas como angulosas, achatadas e alongadas. Cabe ressaltar que esse formato pode ser modificado atualmente no processo de britagem, como por exemplo, com uso de VSI.

Para argamassas de assentamento/revestimento, WESTERHOLM *et al.* [11] afirmam que, em termos de tensão de escoamento e viscosidade, as argamassas produzidas com agregados britados apresentem maiores valores, visto que o efeito da forma da partícula é preponderante, além da presença de finos. No entanto, SCOLARO e ROCHA [12] verificaram que a forma e a textura dos grãos da areia não afetam significativamente as propriedades das argamassas autoadensáveis, considerando agregados com granulometrias diferentes, e que a influência do fino presente na areia é mais significativa nas propriedades do estado fresco e na retração.

INÉIA [13] mostrou a viabilidade do uso de pó de pedra basáltica em argamassas autoadensáveis. Esse autor avaliou a substituição do agregado natural de rio por pó de pedra (areia de britagem não beneficiada) e concluiu que esta substituição atende aos critérios necessários para ser um agregado miúdo alternativo à areia de rio. Além da parcela de finos e da composição granulométrica contínua da areia de britagem, a presença de grãos maiores nestas areias pode reduzir a quantidade de pasta, contribuindo, assim, com a redução da retração plástica. Neste estudo, a substituição melhorou significativamente as propriedades da argamassa, além de minorar os impactos ambientais decorrentes da exploração de areia natural. No entanto, o autor usou um traço muito rico em cimento Portland (1:1,25, cimento:areia), não reduzindo o impacto ambiental, uma vez que para a produção de 1t de cimento são emitidas de 0,8 a 1t de CO₂.

BETIOLI *et al.* [14] observou que, ao substituir areia natural de rio por areia de britagem, houve uma redução na demanda de água, bem como o aumento da demanda de finos, a fim de evitar a exsudação e manter a faixa de espalhamento estipulada. Tal alteração foi necessária, segundo os autores, principalmente, pela alteração da composição do esqueleto granular da mistura, já que a areia de britagem é mais grossa. Vale ressaltar que o traço utilizado neste caso foi de 1:3 (cimento:areia, em massa).

BENABED *et al.* [15] observou a influência de areias com módulos de finuras diferentes, formas e

texturas semelhantes em argamassas autoadensáveis, sendo que o uso de areia de duna (com menor módulo de finura, 0,78) reduziu a fluidez quando comparado à areia de britagem (módulo de finura de 2,21) e areia de rio (módulo de finura de 2,45). Os autores concluíram que o principal fator no impacto da fluidez causado por agregados em argamassas autoadensáveis é, no geral, o tamanho dos grãos presentes no esqueleto granular.

O uso de areia de britagem vem crescendo e, segundo WEIDMANN [16], fatores como constância nas propriedades granulométricas, baixo teor de impurezas e o menor impacto ambiental, vêm contribuindo para isso. Nas pedreiras, o material residual do próprio processo produtivo, varia de 10% a 40%, conforme tipo de britagem [17], sendo que este material tem potencial para várias utilizações, como por exemplo para argamassas autoadensáveis. Assim, o uso da areia de britagem seria uma alternativa econômica em substituição às areias extraídas de rios ou de jazidas, minimizando o impacto ambiental que estas provocam. Portanto, nota-se uma necessidade de estudos de traços com a substituição do agregado miúdo natural por agregado de britagem, observando não somente nas questões técnicas já mencionadas anteriormente, mas, também, na redução da degradação das áreas de exploração.

Perante o exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades das argamassas autoadensáveis no estado fresco e endurecido produzidas com composições de agregado miúdo (areia de rio e areia de britagem) com intuito de reduzir o consumo de areia natural de rio, uma vez que a mesma gera um impacto devido a sua extração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se o cimento Portland composto com fíler (CP II-F-32), por ser um cimento com baixo teor de adição. Também foram utilizados um fíler granítico (resíduo do processo de britagem de rochas) e dois agregados miúdos provenientes de rio (areia natural de rio) e de processo de britagem (areia natural de britagem granítica). As características físicas destes materiais são descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização dos materiais utilizados (Fonte: autores).

MATERIAL	PROPRIEDADE	RESULTADO
Cimento CP II F 32	Massa específica (g/cm ³) [18]	3,07
	Área superficial específica (m ² /g)*	0,98
Fíler granítico	Massa específica (g/cm ³) [18]	2,70
	Área superficial específica (m ² /g)*	1,12
Areia de rio	Massa específica (g/cm ³) [19]	2,64
	Dimensão máxima característica (mm) [20]	2,4
	Módulo de finura [20]	1,57
	Material Pulverulento (%) [21]	6,86
	Massa Unitária (kg/m ³) [22]	1630
Areia de britagem granítica	Massa específica (g/cm ³) [19]	2,66
	Dimensão máxima característica (mm) [20]	4,8
	Módulo de finura [20]	2,73
	Material Pulverulento (%) [21]	8,21
	Massa Unitária (kg/m ³) [22]	1929

* Equipamento utilizado Belsorp Max.

A distribuição granulométrica dos materiais utilizados foi determinada no granulômetro a laser Helos (Sympatec) com faixa de detecção de 0,1 µm a 9500 µm e é apresentada na Figura 1. Observa-se que a curva granulométrica da areia de britagem é mais contínua que a areia de rio e com a presença de grãos maiores

(D_{máx} 4,8 mm).

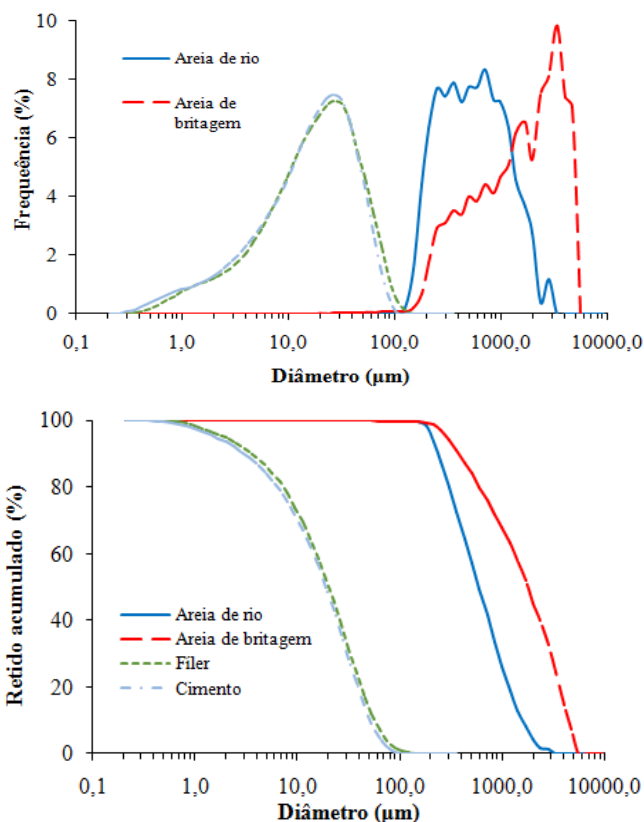


Figura 1: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados (Fonte: autores).

A Figura 2 apresenta imagens dos grãos retidos na peneira 2,40mm de areia de rio (a) e da areia de britagem granítico (b) utilizados nesta pesquisa. Observa-se forma semelhante entre as duas areias utilizadas.

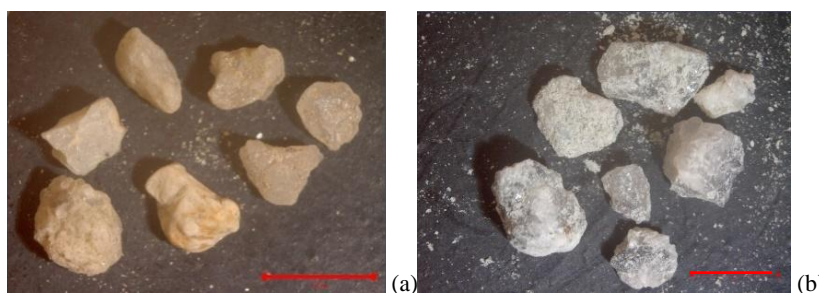


Figura 2: Imagens dos grãos retidos na peneira 2,40mm da areia de rio (a) e de areia de britagem (b), marca de escala de 5mm. (Fonte: autores).

Os aditivos químicos utilizados foram: aditivo superplastificante (SP) sintético de polímeros policarboxilatos e aditivo modificador de viscosidade (VMA). O aditivo superplastificante garante a fluidez necessária, enquanto o modificador de viscosidade oferece coesão para a argamassa. A Tabela 2 apresenta as características de cada aditivo, segundo o fabricante.

Tabela 2:Características dos aditivos utilizados (Fonte: MC Balchemie).

ADITIVO	CARACTERÍSTICA	UNIDADE	VALOR	OBSERVAÇÕES
---------	----------------	---------	-------	-------------

SP	Densidade	g/cm ³	1,12	-
	Dosagem Recomendada	%	0,2 a 5	em relação à massa de cimento
VMA	Densidade	g/cm ³	1,00	-
	Dosagem Recomendada	%	0,1 a 1,5	em relação à massa de cimento

2.2 Composição e mistura das argamassas autoadensáveis

O traço utilizado para produção das argamassas autoadensáveis foi de 1:3 (cimento:areia, em massa) com 17,8% de fíler granítico em relação à massa de cimento, apresentado na Tabela 3. Estas proporções de materiais foram definidas com base na pesquisa realizada por BETIOLI *et al.* [14]. Foram avaliadas três composições com substituição em massa de areia de rio por areia de britagem: 75% areia de rio e 25% areia de britagem (AR75AB25); 50% areia de rio e 50% areia de britagem (AR50AB50); e 25% areia de rio e 75% areia de britagem (AR25AB75).

Tabela 3: Composição das argamassas autoadensáveis (Fonte: autores).

PROPORÇÃO (em relação à massa de cimento, kg/kg)	AR75AB25	AR50AB50	AR25AB75
Agregado	3		
Fino de britagem	0,178		
Água	0,74	0,66	0,55
Aditivo SP	0,007		
Aditivo VMA	0,004		

Após definida as composições, determinou-se a massa unitária de cada mistura, de acordo com a norma brasileira [22] e a massa específica da mistura de acordo com a (Equação 1) conforme TUTIKIAN e DAL MOLIN [9], cujos resultados encontram-se na Tabela 5.

$$M_{RB} = \frac{[(M_R \cdot \%R) + (M_B \cdot \%B)]}{100} \quad (1)$$

Onde:

Mn a massa específica de um agregado n, sendo R para areia de rio e B para areia de britagem

%n a porcentagem do agregado n no agregado total.

A partir dos valores obtidos na Equação 1, obteve-se o índice de vazios de cada composição (Tabela 4). Observa-se que o índice de vazios diminui à medida que aumenta a substituição de areia de rio por areia de britagem.

Tabela 4: Índice de vazios das composições de agregado miúdo.

Composição	Areia de Rio (% em volume)	Areia de Britagem (%, em volume)	Massa específica da mistura (g/cm ³)	Massa unitária da mistura (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
AR75AB25	75%	25%	2,645	1,738	34,27
AR50AB50	50%	50%	2,65	1,832	30,86
AR25AB75	25%	75%	2,655	1,898	28,50

Os parâmetros das composições de mobilidade e de empacotamento são apresentados na Tabela 5 e foram determinados conforme MACIEL *et al.* [23]: porosidade; área superficial volumétrica (ASV); área superficial específica (ASE); distância de separação entre as partículas mais finas (IPS) e espessura máxima de pasta entre os agregados (MPT).

Tabela 5: Parâmetros de porosidade e empacotamento das argamassas.

Composição	ASV (m ² /cm ³)	ASE (m ² /cm ³)	Porosidade (%)	IPS (micra)	MPT (micra)
AR75AB25	1,45	0,52	10,38	1,096	1,809
AR50AB50	1,52	0,55	7,92	0,943	1,576
AR25AB75	1,60	0,58	5,21	0,752	1,328

Para a produção das argamassas autoadensáveis foi fixado o teor de aditivos químicos e de fíler granítico em relação à massa de cimento. A quantidade de água adicionada baseou-se no ensaio de espalhamento pelo mini tronco de cone com valor de (300 ± 20) mm, respeitando a EFNARC [24] que exige valor maior ou igual a 220 mm. O procedimento de mistura das argamassas foi realizado em argamassadeira planetária e adaptado de MARTINS *et al.* [25]: mistura dos materiais secos por 60 s, em seguida a adição de 50% da água e mistura por mais 60 s, o restante da quantidade de água e mistura por 60 s. Com a argamassadeira desligada foi adicionado o aditivo dispersante (SP) e ligou-se a argamassadeira por mais 60 s. Por último, foi acrescentado o aditivo promotor de viscosidade e mistura por 120 s. Toda mistura foi realizada na velocidade 1 no misturador.

2.3 Propriedades avaliadas no estado fresco e no endurecido

As propriedades no estado fresco avaliadas foram: fluidez através do ensaio de espalhamento pelo método do mini tronco de cone [26], sem realizar a compactação da mesa; exsudação e aparência de borda (através da análise visual); densidade de massa e teor de ar incorporado [27].

No estado endurecido, aos 28 dias, foram avaliadas a resistência à tração na flexão e resistência à compressão [28]; a densidade de massa aparente [29]; além do módulo de elasticidade dinâmico [30]. Os corpos de prova ficaram por 48 horas nos moldes, depois 5 dias em ambiente com (95±5)% de umidade e em seguida 21 dias em (65±5)%, com temperatura de (23±2)°C [31]. Foi utilizado o teste de Duncan para análise estatística dos resultados.

A eficiência das argamassas foi avaliada através do Índice de Intensidade de Ligante (IL) [32]. O seu valor é encontrado através da divisão do resultado de consumo de cimento Portland da argamassa em Kg/m³ pelo valor encontrado de resistência à compressão no estado endurecido, em MPa, Equação 2. Quanto maior o seu valor significa que maior é a quantidade de cimento Portland para a mesma função, neste caso resistência à compressão aos 28 dias e, portanto, menos ecoeficiente é a mistura. Já a porcentagem de eficiência (%Eficiência) foi calculada seguindo a Equação 3.

$$IL = \frac{\text{Consumo de Cimento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Resistência à Compressão (MPa)}} \quad (2)$$

$$\% \text{ Eficiência} = \frac{(IL_{\text{referência}} - IL_{\text{argamassa ensaiada}})}{IL_{\text{referência}}} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

IL é o índice de intensidade de ligante;

IL_{referência} é a intensidade de ligante da argamassa referência (AR75%AB25%);

IL_{argamassa ensaiada} é a intensidade de ligante das argamassas (AR50%AB50 ou (AR25%AB75%).

3. RESULTADOS

Todas as argamassas avaliadas apresentaram um diâmetro de espalhamento superior ao diâmetro mínimo de 220 milímetros recomendado pela EFNARC [24], apresentando diâmetros numa faixa de (300 ± 15) mm. A Tabela 6 apresenta o diâmetro de abertura de cada argamassa avaliada, além da densidade de massa e o teor de ar incorporado. A Figura 3 mostra as imagens das argamassas autoadensáveis após o espalhamento, demonstrando bordas uniformes e sem presença de exsudação. Observa-se ainda uma redução do teor de ar incorporado com aumento da densidade de massa (Tabela 6).

Tabela 6: Propriedades no estado fresco das argamassas avaliadas.

Composição	a/c (kg/kg)	Fluidez Diâmetro de abertura (mm)	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
AR75AB25	0,74	287,8	2,03	6,15
AR50AB50	0,66	300,5	2,07	5,78
AR25AB75	0,55	308,5	2,18	4,11

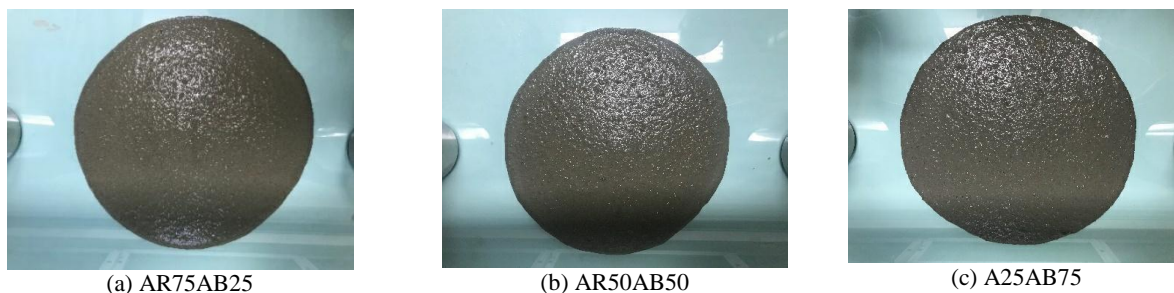


Figura 3: Argamassas avaliadas no estado fresco.

A substituição da areia de rio por areia de britagem demandou uma menor quantidade de água para uma mesma fluidez (resultando num aumento no consumo de cimento por m³), reduzindo assim a relação água/cimento e diminuindo o volume de pasta (Tabela 7). Estes aspectos alteraram as propriedades das argamassas, como o empacotamento e, principalmente, características da própria pasta. Este comportamento pode ser explicado pela melhora no empacotamento devido ao menor índice de vazios do esqueleto (Tabela 4) comprovado pela redução da porosidade, do IPS e do MPT calculados (Tabela 5) e pela necessidade de um menor volume de pasta de cimento Portland na mistura para uma mesma trabalhabilidade, uma vez que granulometria das misturas das areias tornou-se mais contínua e, também, por substituir uma areia mais fina (rio) por uma mais grossa (britagem) (maior módulo de finura – Tabela 1- e maior dimensão máxima – Figura 1). Nota-se que a composição com 75% de areia de britagem apresentou maior fluidez, menor ar incorporado e maior densidade de massa, o que refletirá positivamente no comportamento mecânico.

Em função da densidade de massa e do teor de ar obtido foram calculados os consumos reais de materiais por m³ de cada composição no estado fresco e estão apresentados na Tabela 7. Observa-se uma redução no teor de água em função da substituição da areia de rio por areia de britagem, devido ao menor teor de pasta.

Tabela 7: Consumos reais de materiais (kg/m³) e fração volumétrica (m³/m³) das argamassas autoadensáveis no estado fresco.

Material	AR75AB25		AR50AB50		AR25AB75	
	kg/m ³	fração volumétrica	kg/m ³	fração volumétrica	kg/m ³	fração volumétrica
Cimento	411,85	13,42%	428,95	13,97%	460,01	14,98%
Areia de rio	926,66	35,10%	643,43	24,37%	345,01	13,07%
Areia de britagem	308,89	11,66%	643,43	24,28%	1035,03	39,06%
Filer granítico	73,31	2,72%	76,35	2,83%	81,88	3,03%
Água	304,77	30,48%	283,11	28,31%	253,01	25,30%
Ar	-	6,21%	-	5,80%	-	4,08%
Aditivo SP	2,88	0,26%	3,00	0,27%	3,22	0,29%
Aditivo VMA	1,65	0,17%	1,72	0,17%	1,84	0,18%
Água + Cimento + Filer + Ar + Aditivos (Pasta)	794,46	53,24%	793,13	51,35%	799,96	47,87%

Os resultados obtidos das propriedades no estado endurecido encontram-se na Figura 4 e na Tabela 8. Todas as argamassas estudadas estão de acordo com a EFNARC [24] que estipula como resistência à compressão mínima de 20 MPa e resistência à tração na flexão mínima de 5 MPa. Observa-se que os valores aumentam com o aumento de substituição de areia de rio por areia de britagem e tem relação com a

diminuição do teor de ar incorporado (Tabela 6), com o aumento do consumo de cimento por m³ (Tabela 7), com o aumento do módulo de elasticidade e aumento da densidade de massa (Tabela 8).

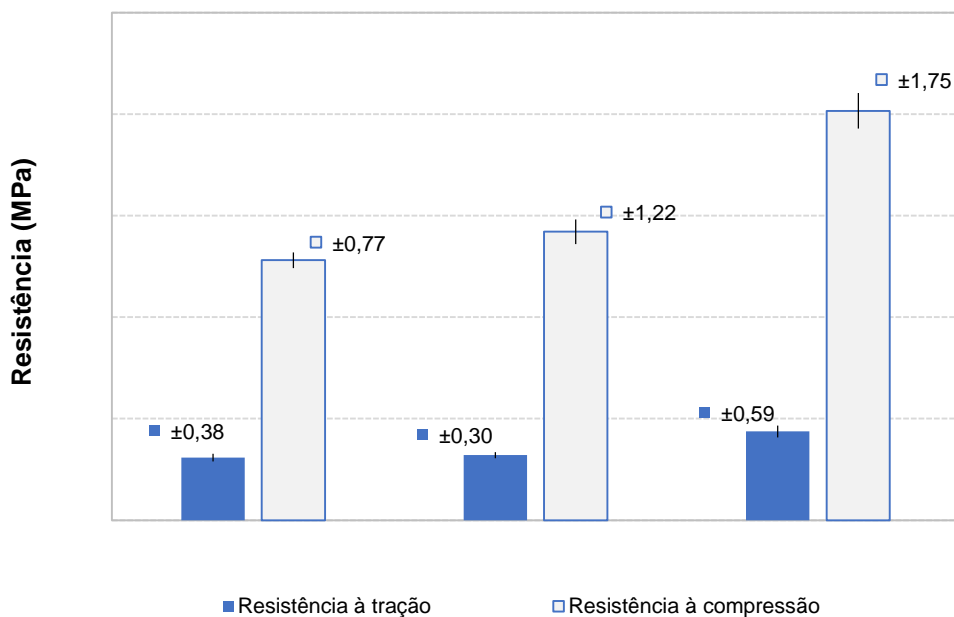


Figura 4: Resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas autoadensáveis. Os valores mínimos estipulados pela EFNARC [24] são de 20MPa para resistência à compressão e 5MPa para resistência à flexão.

Tabela 8: Resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa aparente das argamassas autoadensáveis.

Composição	Módulo dinâmico (GPa) e desvio-padrão	Densidade de massa aparente (g/cm ³)
AR75AB25	19,74 ± 0,45	1,94
AR50AB50	24,29 ± 0,86	2,03
AR25AB75	28,51 ± 0,53	2,13

Observa-se na Tabela 9 o ganho de resistência com aumento da substituição de areia de rio por areia de britagem, verificando um aumento considerável quando se substitui 50% de areia de rio por areia de britagem. Através da análise estatística pelo método de Duncan, foi verificado que existe diferença significativa entre as médias, com 95% de confiabilidade. O aumento na resistência mecânica ao substituir areia de rio pela areia de britagem (Figura 4 e Tabela 9) nesta pesquisa, conforme já mencionado, foi principalmente pela redução na relação água/cimento (Tabela 7), redução no consumo de água e aumento do consumo de cimento Portland por m³, e pelo aumento na densidade de massa aparente (Tabela 8), sendo também influenciado por demais fatores, como a alteração no empacotamento da mistura, alteração no volume e composição da pasta, causados pela mudança no consumo de cimento por m³.

Tabela 9: Aumento de resistência à compressão (Fonte: autores).

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Ganho % na resistência
AR75AB25	25,62	-
AR50AB50	28,42	11
AR25AB75	40,33	57

O aumento de resistência com substituição de areia de rio por areia de britagem também foi observado

por INÉIA [13], porém em seu estudo a relação água/cimento foi mantida constante e o mesmo utilizou pó de pedra (areia de britagem não lavada). Neste caso ele atribuiu o ganho de resistência pela presença de um material fino aumentar a compacidade da pasta, minorando sua porosidade e, por consequência, tornando a argamassa mais rígida e, também, pela melhora no empacotamento da mistura com aumento no teor de areia de britagem.

Cabe ressaltar que as argamassas avaliadas nesta pesquisa com a substituição de areia de rio por areia de britagem resultou em um aumento de 4 e 12% no consumo de cimento Portland por m³ das argamassas AR75AB25 para AR50AB50 e AR75AB25 para AR25AB75, respectivamente, o que pode ser reduzido através de um ajuste no traço substituindo parte do cimento Portland por fíler granítico ou aumentando os teores de fino e desagregado para uma mesma resistência.

Em relação à argamassa AR25AB75, os resultados obtidos da Tabela 10 demonstram que o aumento no teor de substituição de areia de rio por areia de britagem a argamassa mostrou-se mais eficiente, ou seja, teoricamente, possui um consumo menor de cimento Portland por m³ para atingir 1 MPa de resistência à compressão. E, desta forma, o traço poderia ser corrigido conforme comentado anteriormente.

Tabela 10: Índice de intensidade de ligante das argamassas desenvolvidas (Fonte: autores).

	AR75AB25	AR50AB50	AR25AB75
Consumo de cimento (kg/m ³)	411,85	428,95	460,01
Resistência à compressão (MPa)	25,62	28,42	40,33
Índice de intensidade de ligante (IL)	16,08	15,09	11,41
Eficiência (%)	-	6	29

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que, além de ser viável produzir argamassas autoadensáveis utilizando areias de britagem, essa substituição pode trazer diversas melhorias nas características técnicas e ambientais do produto, por meio de substituição de um material extraído da natureza por outro que gera alto impacto, um resíduo muitas vezes descartado.

Nas argamassas autoadensáveis avaliadas, a substituição da areia natural de rio por areia de britagem resultou em uma redução no consumo de água devido ao maior módulo de finura da areia de britagem e melhor empacotamento da composição (granulometria mais contínua), resultando em menor consumo de pasta em volume.

A redução no consumo de água, aliado à relação cimento: agregado constante, resultou em uma redução da relação água/cimento e, consequentemente, o aumento do consumo de cimento Portland por m³, o que refletiu em aumento nos valores de resistências à compressão e resistência à tração, além do aumento no módulo dinâmico. Constatou-se que a composição com 75% de areia de britagem (substituição de 75% de areia de rio por areia de britagem) apresentou maior fluidez, menor teor de ar incorporado, maior densidade de massa e maior desempenho mecânico. Apesar do aumento no consumo de cimento Portland por m³, para se obter a resistência à compressão de 20 MPa (estipulada por norma) seria possível um ajuste no traço substituindo parte do cimento Portland por fíler granítico ou um aumento na quantidade de finos e de agregados.

As argamassas com maior incorporação de areia de britagem apresentaram menor índice de ligante, logo, necessitam de um menor consumo de cimento Portland para obter 1 MPa de resistência à compressão, representando uma maior eficiência.

Levando em consideração que os valores de resistência das argamassas com maior teor de areia de britagem são maiores, é possível reduzir o consumo de cimento Portland por m³ com ajustes na composição em pesquisas futuras.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) - Campus Florianópolis, os quais concederam as bolsas de Iniciação Científica (IC) e ao Instituto Nacional Tecnologias Cimentícias Ecoeficientes Avançadas (FAPESP INCT 2014 50948-3; 465593/2014-3). Agradecem também a Cedro

Engenharia, MC-Bauchemie e a Itambé pelas doações dos materiais utilizados nesta pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MARTINS, E.J. Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [2] RIZWAN, S.A., BIER, T.A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 398-403, 2012.
- [3] ISHIKAWA, P.H., OLIVEIRA, L.P., “Propriedades da argamassa com areia artificial para revestimento de alvenaria. In: *4º Congresso Português de Argamassas e Construção*, Lisboa, 2012.
- [4] BASTOS, apud TEODORO, S.B. Avaliação do uso de areia de britagem na composição do concreto estrutural. Trabalho de Conclusão de Curso, Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, 2013.
- [5] MENOSSE, R. T. Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. 2004. vi, 97 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004.
- [6] ANDRIOLO, F.R. Construções de concreto. São Paulo, Primeira ed. Pini. 2005.
- [7] Ministério de Minas e Energia, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2010>, acessado em dezembro de 2018.
- [8] HICKEL, G.C., *et al.* Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 902-930, Aug. 2018.
- [9] TUTIKAN, B.F., DAL MOLIN, D.C., *Concreto auto-adensável*, Ed. PINI, São Paulo, SP, 2008.
- [10] METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2a. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [11] WESTERHOLM, M., *et al.* Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 4, p. 274-282, 2008.
- [12] SCOLARO, T.P., ROCHA, J.C. Influence of the physical characteristics of sand and the crushed filler content on the properties of self-leveling mortars. *Cerâmica*, v. 67, p. 179-187, 2021.
- [13] INÉIA, A. *Viabilização da substituição da areia natural pelo pó de pedra basáltico na argamassa autonivelante*. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2017.
- [14] BETIOLI, A.M., *et al.* Efeito do tipo de fino e do agregado miúdo nas propriedades da argamassa autoadensável. Florianópolis: Ibracon, 2020.
- [15] BENABED, B., *et al.* Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 10, p. 1167-1173, 2012.
- [16] WEIDMANN, D.F., *et al.* Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland. 2008.
- [17] CUCHIERATO G., apud ISHIKAWA, Paulo Hidemitsu; OLIVEIRA, L.P. Propriedades da argamassa com areia artificial para revestimento de alvenaria. In: *Anais do 4. Congresso Português de Argamassas e ETICS*. 2012.
- [18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6474. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2001.
- [19] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52. Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.
- [20] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2003.
- [21] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. 2003.
- [22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.
- [23] MACIEL, M.H., *et al.*, “Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas”, *Ambiente Construído*, v. 18, n. 1, pp. 245-259, jan./mar. 2018.
- [24] EFNARC. Specification for Synthetic Resin and Polymer-modified Cementitious Floorings as wearing surfaces for industrial and commercial use. United Kingdom, 2001.
- [25] MARTINS, B.H.R., *et al.* “Influência da adição de diferentes finos em argamassa autoadensável.” In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 61, Fortaleza, 2019.
- [26] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. 2016.
- [27] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.
- [28] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2005.
- [29] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. 2005.

- [30] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. 2009.
- [31] BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BSI EN13892-1. Methods of test for screed materials. Sampling, making and curing specimens for test, 2002.
- [32] DAMINELLI, B.L., *et al.*, “Measuring the eco-efficiency of cement use”, Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 18, p. 555-562, set. 2010.

ORCIDGeraldo Luís Becker Duarte <https://orcid.org/0000-0002-3306-0902><https://orcid.org/0000-0002-3306-0902>Bruno José da Silva <https://orcid.org/0000-0002-6543-3726><https://orcid.org/0000-0002-6543-3726>Ben-Hur Raíra Martins <https://orcid.org/0000-0001-6109-2461><https://orcid.org/0000-0001-6109-2461>Juliana Machado Casali <https://orcid.org/0000-0002-8583-9395><https://orcid.org/0000-0002-8583-9395>Andrea Murillo Betioli <https://orcid.org/0000-0002-0182-164X><https://orcid.org/0000-0002-0182-164X>