

ESTUDO COMPARATIVO ACERCA DE APLICAÇÕES DO USO DE PÓ DE PEDRA COMO SUBSTITUTO DE AGREGADOS NATURAIS EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Raphaelle Silva de Almeida¹ Tiago Silveira de Andrade Aquino²; Juan Veron Vieira Bonifácio³
Felipe Albuquerque Frota Sousa⁴ Bruna Maria Sousa dos Santos⁵ Pedro Araújo Plutarcho⁶

Resumo – Visando mitigar os efeitos negativos da indústria da construção civil e de infraestrutura, bem como a crescente escassez de jazidas de agregados naturais, iniciou-se a busca por materiais alternativos que respondessem de forma satisfatória aos requisitos exigidos a esses compósitos. Nesse contexto, a utilização de pó de pedra (areia artificial) surge como uma alternativa viável. Neste trabalho foram comparados os resultados obtidos por seis autores em suas pesquisas de viabilidade da utilização de pó de pedra como substituto total ou parcial da areia natural. Um dos autores observou que a resistência à compressão aumentou em até 17% para um percentual de substituição de 100% e idade de 28 dias. Outro aspecto analisado foi a composição granulométrica, com o objetivo de verificar possíveis relações entre esses parâmetros e o incremento da resistência à compressão axial. Ao comparar o fator água/cimento (A/C), percebeu-se que o autor que obteve o maior ganho percentual de resistência foi também aquele que utilizou o maior valor desse fator na mistura. Sugere-se que a resistência obtida possa estar relacionada à granulometria e/ou à forma dos agregados, em função das características de empacotamento do material. Considerando o estado do Ceará como referência para a análise financeira, a substituição total do agregado miúdo resultou em uma redução de 10,8% no custo do concreto, sendo o maior impacto verificado no consumo de cimento. Conclui-se, portanto, que é possível obter um ganho na resistência à compressão, além de uma redução de custos, ao substituir o agregado natural pelo artificial.

Abstract – In order to mitigate the negative impacts of the construction industry (both civil and infrastructure) and the growing shortage of natural aggregate deposits, alternative materials that meet the required performance standards have been sought. In this context, rock dust (artificial sand) has emerged as a viable option. This study compared the findings of six authors who investigated the feasibility of partially or fully replacing natural sand with rock dust in concrete. One study reported an increase of up to 17% in compressive strength at 28 days for a 100% replacement. Another relevant aspect analyzed was particle size distribution, aiming to identify possible correlations between this parameter and the increase in axial compressive strength. When comparing the water/cement (w/c) ratio, it was observed that the greatest relative gain in compressive strength occurred in the case where the highest w/c ratio was also adopted. It is suggested that this strength improvement may be related to aggregate gradation and/or shape, due to the material's packing characteristics. Using the state of Ceará as a financial reference, full replacement of fine aggregate led to a 10.8% reduction in concrete costs, with the greatest impact observed in cement consumption. Therefore, it is concluded that replacing natural aggregate with artificial sand can provide both an increase in compressive strength and a reduction in concrete production costs.

Palavras-Chave – agregados artificiais – concretos convencionais – resistência à compressão

¹ Geól., MSc, Universidade de Fortaleza Tal, (85) 8871-1987, raphaelle@unifor.br

² Eng Civil, MSc, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará – IFCE, Tal, (85) 9997-2211, tiago.silveira@ifce.edu.br

³ Graduando Eng Civil, Universidade de Fortaleza Tal, (85) 9980-1880, juanveronvb@gmail.com

⁴ Graduando Eng Civil, Universidade de Fortaleza Tal, (85) 8881-7477, frotaffelipe@gmail.com

⁵ Graduanda Eng Civil, Universidade de Fortaleza Tal, (85) 9224-9591, bplua1009@gmail.com

⁶ Graduando Eng Civil, Universidade de Fortaleza Tal, (85) 8707-4444, pedroplutarcho@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A indústria de agregados minerais fornece insumos fundamentais para a infraestrutura urbana, industrial e para a malha viária nacional, de modo a atender à crescente demanda por espaços urbanizados e localidades com acesso a redes de transporte de bens, informações, energia e água. Há uma estreita interface entre o consumo de agregados minerais pela sociedade e o padrão de vida desfrutado por sua população.

Diversos fatores influenciam a extração e o uso desses materiais naturais. Dentre eles, destaca-se o baixo valor econômico dos agregados, o que torna economicamente inviável a exploração de jazidas muito distantes das áreas de utilização. Além disso, a mineração e o beneficiamento de agregados geram impactos ambientais consideráveis, como poluição sonora e atmosférica, além do assoreamento de corpos hídricos.

Na busca por alternativas sustentáveis, têm sido estudados o uso de resíduos, como os RCDs (resíduos da construção e demolição), e materiais provenientes do beneficiamento de rochas em pedreiras, como as areias de britagem. No entanto, o uso de RCDs apresenta algumas desvantagens, conforme demonstrado em pesquisas como a de Santos e Isaia (2020). Entre elas, destacam-se a alta variabilidade nas características do material — oriundo de descarte de diversas naturezas — e sua elevada porosidade, que interfere diretamente na relação água/cimento do concreto.

Indo além da substituição dos agregados miúdos, pesquisas como a de Polucha (2016) também estudaram a substituição parcial do cimento Portland por fíler calcário em concretos autoadensáveis. Nessa pesquisa, foi identificado que, com a substituição de materiais e o aumento do fator água/cimento, foi possível reduzir em 10,4% o consumo de cimento, com uma diminuição de apenas 1,84% na resistência à compressão de um concreto com f_{ck} de 60 MPa. Diante desses fatores, torna-se cada vez mais necessário pensar em sustentabilidade e no uso de materiais alternativos. Nesse sentido, a areia de britagem apresenta-se como uma excelente alternativa, pois, além de reduzir a necessidade de extração de areia natural, contribui para mitigar o problema do descarte e acúmulo desse subproduto nas pedreiras.

O objetivo do presente trabalho é avaliar os resultados obtidos em seis estudos que analisaram a eficiência da areia artificial como substituto do agregado miúdo natural em concretos de cimento Portland. Como critério de avaliação, optou-se por comparar a resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com diferentes proporções de substituição do agregado natural pelo artificial. A viabilidade técnica dessa substituição foi analisada com base na adequação da curva granulométrica da areia artificial à da areia natural, bem como na conformidade de suas propriedades físicas com as normas técnicas vigentes. Além disso, foi avaliado o possível impacto financeiro da substituição na composição de uma mistura de concreto de cimento Portland.

2. ESTUDOS DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA AGREGADO MIÚDO

Buscou-se identificar, com base em experimentos e pesquisas anteriores, as contribuições práticas para viabilizar a substituição do agregado miúdo natural. Como critérios de viabilidade, foram definidos os ganhos em resistência à compressão e a redução no custo de obtenção dos materiais. Para facilitar a comparação entre os resultados, foram selecionados trabalhos com características experimentais semelhantes, especialmente no que se refere à granulometria dos materiais e ao projeto de dosagem do concreto avaliado. Também foi analisado o impacto da substituição do agregado na relação água/cimento do concreto, bem como os efeitos financeiros associados.

A substituição total ou parcial da areia natural por pó de pedra (ou areia de britagem) tem se mostrado uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais decorrentes da extração de areia natural, atividade comumente realizada em leitos de rios. No Brasil, essa prática remonta ao final dos anos 1990. Já em 2001, Valverde alertava, em seu relatório, para os problemas relacionados à disponibilidade, ao licenciamento, à extração e ao transporte de agregados — especialmente os oriundos de cursos d'água. O autor também apontava soluções que já vinham sendo adotadas à época, como o aproveitamento de rejeitos calcários (bica corrida) provenientes da produção de brita, entre outros materiais alternativos.

Uma das principais vantagens da areia artificial é sua distribuição granulométrica homogênea, obtida por meio de processos mecânicos de britagem que conferem maior uniformidade aos grãos. No entanto, uma desvantagem observada é o formato anguloso e a

superfície áspera desses grãos, o que pode demandar maior consumo de água para alcançar a mesma trabalhabilidade, conforme apontado por Teodoro (2013).

Chitlange, Pajgade e Nagarnaik (2008) estimaram que o uso de agregado artificial pode reduzir em até 20% o custo do concreto, considerando que o processo de beneficiamento do material (como peneiramento e lavagem) já é normalmente realizado durante a produção do agregado. Por outro lado, Prasad e Shruthi (2018) observaram que a substituição não resultou em ganho de resistência à compressão, devido à porosidade e à presença de argila no agregado utilizado, proveniente da trituração de material cerâmico.

Em pesquisas mais recentes, Sales (2019) e Costa (2021) avaliaram a eficiência da substituição total ou parcial da areia natural por areia de britagem, observando os efeitos dessa alteração na resistência à compressão do concreto. Para a realização desta pesquisa, foram selecionados trabalhos que abordam a substituição total ou parcial da areia natural por areia artificial na produção de concretos. Os critérios para escolha dos estudos incluíram: uso de pó de pedra como substituto total ou parcial do agregado miúdo natural; apresentação de dados de caracterização do material artificial; determinação da resistência à compressão do concreto endurecido aos 28 dias de idade; e especificação da relação água/cimento utilizada nas misturas. Este estudo analisa os materiais, os procedimentos experimentais e os resultados obtidos por seis autores, cujos dados estão organizados no Quadro 1.

Quadro 1. Publicações analisadas na pesquisa acerca de substituição de agregados naturais por agregados artificiais.

ANO	AUTOR(ES)	TÍTULO
2008	Chitlange, Pajgade e Nagarnaik	Experimental Study of Artificial Sand Concrete.
2013	Mogre, Parbat e Bajad	Feasibility Of Artificial Sand In Concrete
2018	Bajad e Sakhare	Influence of artificial sand on the properties of concrete and mortar
2018	Meisuh, Kankam e Buabin	Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete.
2019	Sales	Utilização de areia artificial como substituição parcial ou total à areia natural em concretos e argamassas.
2021	Costa	A influência da substituição completa ou parcial do agregado miúdo natural por pó de pedra de origem vulcânica no concreto.

3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Foram analisadas e comparadas, em cada artigo selecionado, as características anteriormente descritas — resistência à compressão axial e fator água/cimento — em diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo, considerando resistências de projeto semelhantes. Essa abordagem permitiu uma comparação mais precisa do impacto da substituição sobre o desempenho do concreto. Além disso, foram avaliadas as características granulométricas dos materiais naturais e artificiais utilizados em cada pesquisa, com o objetivo de verificar o possível impacto dessas variações nas propriedades do concreto.

A contribuição do agregado miúdo para determinados atributos do concreto de cimento Portland depende diretamente de suas características físicas. De forma análoga, as propriedades do material substituto também influenciam o desempenho final do concreto produzido. Assim, foram avaliadas e discutidas as características dos materiais utilizados nos estudos selecionados, buscando compreender de que forma esses atributos podem ter influenciado os resultados obtidos.

Com relação à forma dos grãos da areia de britagem, observa-se, visualmente, uma diferença significativa em relação à areia natural de origem quartzosa, a qual apresenta grãos menos irregulares e com formato mais arredondado. A forma dos grãos exerce influência direta sobre a trabalhabilidade das misturas de concreto: grãos mais irregulares e angulosos tendem a aumentar a demanda de água, além de conferirem à mistura uma textura mais áspera (DRAGO; VERNEY; PEREIRA, 2009).

3.1. Comparativo de curvas granulométricas

Ainda sobre a influência das características do agregado miúdo no concreto de cimento Portland, Cabral (2007) ressalta que a influência da granulometria tende a diminuir à medida que se aumenta a dosagem de cimento. O acréscimo de materiais finos, por afetar a coesão da mistura, interfere diretamente na trabalhabilidade do concreto, sendo que o excesso pode provocar segregação dos componentes. Dentre as pesquisas utilizadas como base para este artigo, apenas a de Bajad e Sakhare (2018) não apresentou informações relativas à análise granulométrica dos materiais empregados. Nos demais estudos, as curvas granulométricas dos agregados miúdos naturais e artificiais estão dispostas, respectivamente, nas Figuras 1 e 2. A partir dessas curvas, algumas considerações sobre as características dos materiais utilizados e os resultados obtidos nas pesquisas poderão ser discutidas.

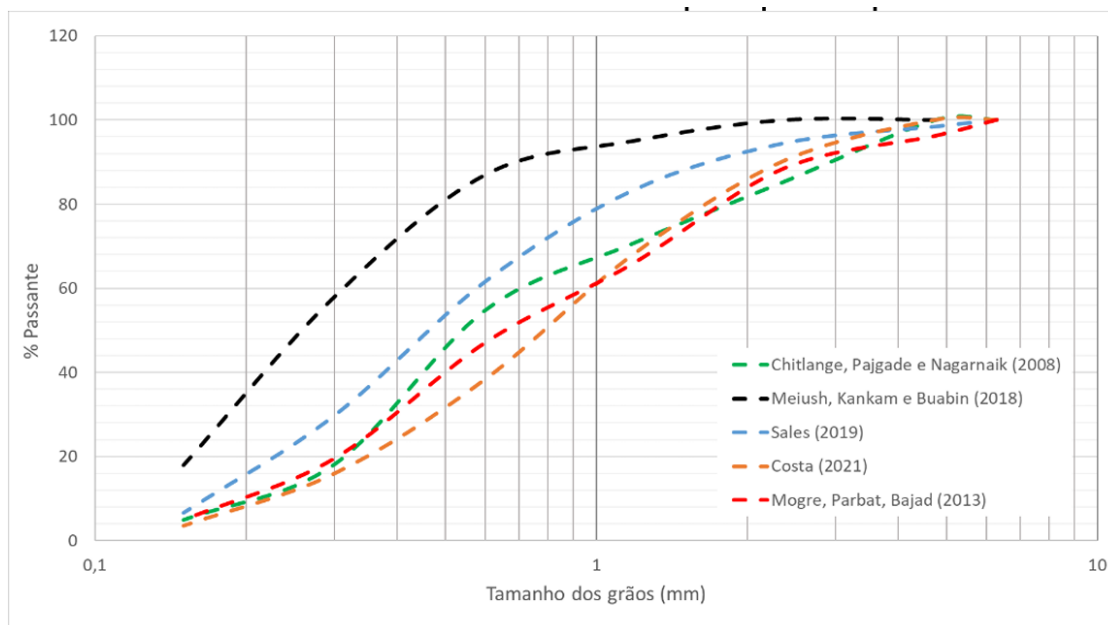


Figura 1 Curvas granulométricas dos agregados miúdos naturais

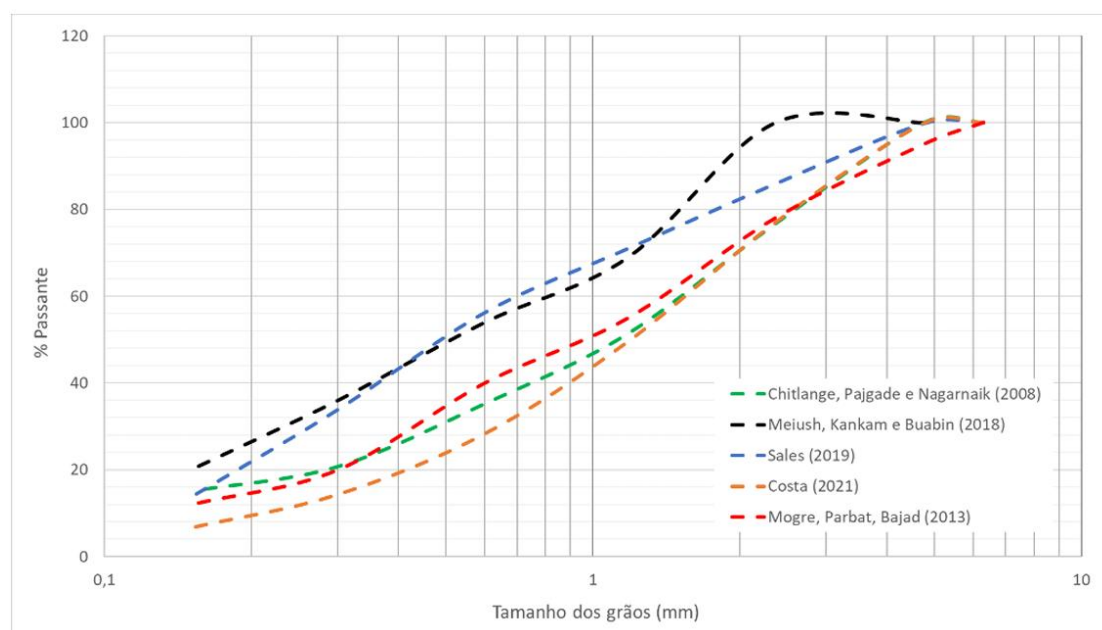


Figura 2 Curvas granulométricas dos agregados miúdos artificiais.

A curva granulométrica é um parâmetro importante na elaboração do projeto de dosagem do concreto, uma vez que os tamanhos e as proporções das frações granulométricas influenciam diretamente o empacotamento das partículas, afetando a compactidade e o desempenho do

concreto. Conforme apresentado na Figura 3, nas pesquisas em que se utilizaram rochas graníticas como objeto de estudo — caracterizadas por textura granulada, grãos intertravados e resistentes, alta densidade e baixa porosidade, configurando um material altamente compacto — observa-se um aumento da resistência à compressão com o incremento da fração inferior a 0,3 mm, como evidenciado nos estudos de Meisuh, Kankam e Buabin (2018) e Costa (2021). No entanto, o efeito oposto foi identificado nas pesquisas de Chitlange, Pajgade e Nagarnaik (2008), bem como de Mogre, Parbat e Bajad (2013), nas quais o aumento dessa fração resultou em redução da resistência à compressão. Dessa forma, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre a presença de finos abaixo de 0,3 mm e a resistência à compressão, sugerindo que outros fatores, como forma das partículas, tipo de rocha e teor de impurezas, também podem influenciar significativamente os resultados.

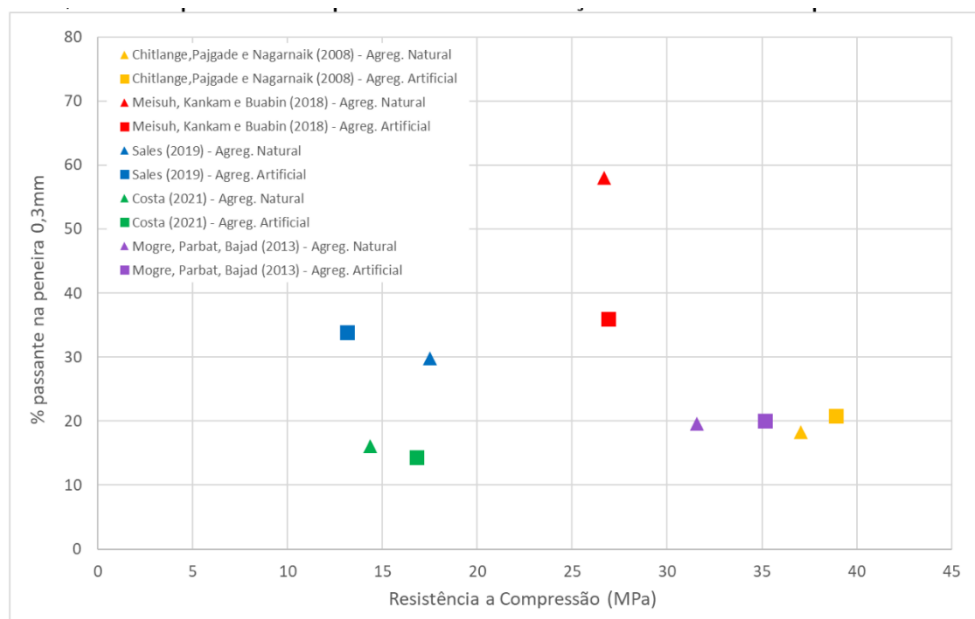


Figura 3 Comparativo de resistência a compressão e percentual passante na peneira 0,3mm do agregado miúdo.

3.2. Dosagens utilizadas nas misturas

Para uma melhor comparação dos resultados entre os artigos analisados, foram selecionados experimentos que utilizaram dosagens padronizadas (especificadas por instruções de trabalho internacionais) ou que adotaram dimensionamento com resistência à compressão de projeto em torno de 20 MPa. As pesquisas de Chitlange, Pajgade e Nagarnaik (2008), Mogre, Parbat e Bajad (2013) e Bajad e Sakhare (2018) utilizaram como referência as dosagens previstas nas normas indianas IS-456 (2000) e IS-10262 (1982), com os traços M20, M25, M30 e M40 — onde o número indica a resistência à compressão de projeto em MPa. Já Meisuh, Kankam e Buabin (2018) adotaram as dosagens propostas por Teychenné et al. (1988), visando resistências de 25, 30, 35, 40 e 45 MPa. Por sua vez, Sales (2019) e Costa (2021) utilizaram uma dosagem empírica experimental, dimensionada para atingir resistência à compressão de 15 MPa.

4. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

A resistência do concreto é, geralmente, a propriedade mais relevante, pois está diretamente associada à qualidade do compósito, sendo relacionada à estrutura geral da pasta cimentícia. Além disso, a resistência à compressão é um parâmetro essencial tanto no projeto estrutural quanto no controle tecnológico da produção (NEVILLE, 2016). A relação água/cimento reflete, empiricamente, a porosidade do material endurecido, bem como o grau de adensamento da mistura. Por isso, constitui um parâmetro de significativa relevância na produção de concretos (NEVILLE, 2016).

Outro fator importante a ser considerado é a forma das partículas do agregado. Sabe-se que partículas mais angulosas exigem maior quantidade de água para que se atinja determinada trabalhabilidade. Atualmente, técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) têm sido utilizadas para avaliação dessa propriedade, embora este aspecto específico não tenha sido abordado neste trabalho. O resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão axial dos autores estudados, bem como as respectivas relações água/cimento utilizadas, encontra-se apresentado na Tabela 1.

Chitlange, Pajgade e Nagarnaik (2008) estimaram que o uso de agregado artificial pode proporcionar uma redução de até 20% no custo do concreto, considerando que o processo de beneficiamento do material (peneiramento e lavagem) já ocorre na produção do agregado artificial. Por outro lado, Prasad e Shruthi (2018) observaram que a substituição pelo agregado artificial — proveniente da trituração de material cerâmico, poroso e argiloso — não resultou em aumento da resistência do concreto. Já Meisuh, Kankam e Buabin (2018), ao estudarem o impacto da substituição da areia natural por pó de pedra na resistência à flexão, constataram que a substituição total reduziu em aproximadamente 1% a resistência à compressão quando utilizado um fator água/cimento de 0,56. No entanto, ao se adotar uma substituição parcial de 25%, foi observado um ganho de aproximadamente 5% na resistência.

Sales (2019), ao realizar uma substituição total do agregado miúdo natural pelo artificial, constatou uma redução na resistência à compressão. O autor atribuiu esse resultado à alta porosidade do agregado artificial, que exigiria um maior fator água/cimento para garantir melhor adensamento da mistura e, conseqüentemente, maior resistência. Essa hipótese foi confirmada por Costa (2021), que utilizou o mesmo material e obteve um aumento de 17% na resistência à compressão ao elevar o fator água/cimento de 0,55 para 0,70. Apesar das evidências positivas observadas em diversos estudos, Drago et al. (2009) identificaram uma redução contínua da resistência à compressão axial dos corpos de prova com o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo artificial.

Tabela 1 - Comparativo entre experimentos de substituição de agregado natural com agregado artificial em concretos de cimento Portland de resistência de projeto de aproximadamente 20Mpa

Característica	Pesquisa					
	(CHITLANGE; PAJGADE; NAGARNAIK, 2008)	(MOGRE; PARBAT; BAJAD, 2013)	(BAJAD; SAKHARE, 2018)	(MEISUH; KANKAM; BUABIN, 2018)	(SALES, 2019)	(COSTA, 2021)
Resistência a Compressão aos 28 dias Utilizando Agregado Natural (MPa)	37,07	31,58	40,01	26,7	17,53	14,37
Resistência a Compressão aos 28 dias Utilizando Agregado Artificial (MPa)	38,92	35,15	41	26,9	10,97	16,83
Impacto na Resistência a Compressão aos 28 dias substituindo o agregado natural por artificial	5%	11%	2%	1%	-37%	17%
Percentual de agregado natural substituído pelo artificial	50%	100%	100%	100%	100%	100%
Fator água cimento	0,5	0,5	0,45	0,56	0,55	0,7

5. RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO E IMPACTO FINANCEIRO

Como observado por Sales (2019) e confirmado por Costa (2021), a utilização de um maior fator água/cimento, empregando os mesmos agregados, resultou em aumento da resistência à compressão. No trabalho de Sales, a mistura com substituição total do agregado natural por agregado britado e fator água/cimento igual a 0,70 apresentou resistência à compressão 20% superior à obtida com fator água/cimento igual a 0,55, utilizando os mesmos materiais.

Para reforçar esse resultado, Costa (2021) obteve um aumento de 17% na resistência à compressão ao substituir o agregado natural pelo britado, utilizando fator água/cimento de 0,70 em ambas as misturas. Em um estudo anterior, Costa (2005) já havia identificado a possibilidade de manter a resistência mecânica com redução de custos. Nesse trabalho, foi utilizado o método de dosagem racional para concretos com resistência de projeto de 32 MPa, aplicando substituições de 25% e 50% do agregado natural por artificial.

Na referida pesquisa, a mistura com 25% de substituição apresentou fator água/cimento de 0,57, enquanto a de 50% de substituição apresentou fator de 0,62 — ambos superiores ao valor da mistura de referência (sem substituição), que foi de 0,56. Os trabalhos posteriores confirmam os achados de Costa, demonstrando que, além da economia com a substituição do agregado, é possível alcançar redução de até 10% no consumo de cimento.

Considerando os dados de Sales (2019), e aplicando os ganhos obtidos com o aumento da taxa água/cimento, foi possível estimar uma economia de aproximadamente 21,4% no consumo de cimento para a obtenção de um concreto com desempenho superior. O impacto econômico total varia conforme a dosagem dos materiais, podendo alcançar, em média, 9,4% de economia no custo final do concreto, com base nos preços da base de dados da SEINFRA/CE em novembro de 2021 para concretos com resistência de 20 MPa.

Atualmente, a economia na produção do concreto, obtida por meio da possível redução no consumo de cimento, pode ser impactada pelo aumento do custo dos agregados. No entanto, observa-se que o custo unitário do agregado natural é, em média, 64,4% superior ao do agregado artificial, segundo dados do Sistema Referencial de Custos do DNIT, com base no mês de julho de 2021.

A substituição do agregado natural pelo britado pode gerar impactos financeiros distintos conforme a região, considerando a escassez local do agregado natural e os custos logísticos envolvidos na obtenção do agregado artificial. No estado do Ceará, por exemplo, o pó de pedra é até 10% mais barato que a areia média comercial, conforme a Tabela de Preços da SEINFRA de dezembro de 2021. Quando se utiliza como base o sistema SICRO do DNIT (julho de 2021), essa diferença pode chegar a cerca de 40%.

Drago, Verney e Pereira (2009) concluíram que há necessidade de incremento na relação água/cimento para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido com agregado artificial, devido à maior absorção de água por esse material. Essa constatação foi comprovada por ensaios de absorção realizados pelos autores, mas também pode ser observada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme relatado por Moraes et al. (2015).

Além da economia gerada pela substituição dos agregados naturais, os trabalhos de Costa e Sales também demonstram a possibilidade de redução no consumo de cimento, com o uso de maiores fatores água/cimento, sem comprometer a resistência mecânica — pelo contrário, obtendo inclusive aumentos na resistência à compressão. Tomando como base a composição de preços da Tabela da SEINFRA (dezembro de 2021), para concretos com fck de 20 MPa, observa-se que uma redução de aproximadamente 20% no consumo de cimento — obtida ao se aumentar o fator água/cimento de 0,55 para 0,70 — pode resultar em uma economia de cerca de 10,8% no custo final do concreto, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Custo total comparativo do Concreto fck 20 MPa com substituição do agregado miúdo e com alteração na relação água/cimento (SEINFRA 12/2021).

ITEM		CUSTO TOTAL (R\$)		
		100% AREIA MÉDIA E A/C = 0,55	100% PÓ DE PEDRA E A/C = 0,55	100% PÓ DE PEDRA E A/C=0,7
I2543	SERVENTE	102,84	102,84	102,84
I1605	PEDRISCO	61,78	61,78	61,78
I0805	CIMENTO PORTLAND	188,16	188,16	147,89
I0109	AGREGADO MIÚDO	57,56	51,55	51,55
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	17,44	17,44	17,44
CUSTO DIRETO TOTAL		427,77	421,77	381,50

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pelos autores pesquisados, pode-se concluir que há possibilidade de ganho na resistência à compressão axial em misturas de concreto de cimento Portland com substituição do agregado natural por agregado artificial, desde que essa substituição seja acompanhada por uma correção adequada do fator água/cimento da mistura.

O maior ganho observado foi o de Costa (2021), que reportou um incremento de 17% na resistência à compressão axial. Dentre os estudos analisados, apenas Sales (2019) não obteve aumento na resistência à compressão com a substituição do agregado. Esse resultado pode estar relacionado à alta porosidade do material artificial utilizado, o que exigiria um fator água/cimento maior para promover melhor adensamento e, consequentemente, maior resistência. Essa hipótese foi explorada pelo próprio autor, que realizou um experimento adicional com aumento do fator água/cimento, obtendo, nessa condição, ganho de resistência.

Não foi possível identificar uma correlação direta entre a composição granulométrica do agregado miúdo e a resistência à compressão axial. Isso se deve ao fato de que, enquanto as pesquisas de Meisuh, Kankam e Buabin (2018) e Costa (2021) apontaram ganho de resistência com o aumento da fração de partículas inferiores a 0,3 mm, os estudos de Chitlange, Pajgade e Nagarnaik (2008) e Mogre, Parbat e Bajad (2013) indicaram o efeito oposto.

A utilização de agregado artificial implica, necessariamente, no aumento do fator água/cimento para garantir adequada trabalhabilidade e ganho de resistência à compressão axial. Essa necessidade foi verificada por Sales (2019) e confirmada por Costa (2021).

Outros estudos devem ser conduzidos para aprofundar essa hipótese, considerando diferentes tipos e porosidades de agregados artificiais, de modo a validar os efeitos observados. Com base nos dados do estado do Ceará, a substituição do agregado natural pelo artificial pode gerar uma redução de até 10,8% no custo final do concreto, resultado da combinação entre menor consumo de cimento (devido ao aumento do fator água/cimento) e menor custo unitário do agregado miúdo. Em outras regiões do Brasil, os impactos econômicos dessa substituição podem variar, sendo recomendada a realização de pesquisas regionais para avaliação mais precisa da viabilidade técnica e econômica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade de Fortaleza pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- BAJAD, M. N.; SAKHARE, S. Influence of artificial sand on the properties of concrete and mortar. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 9, n. 1, p. 447-454, 2018.
- CABRAL, K. O. Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito gnaisse nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido. Goiânia: [s.n.].
- CHITLANGE, M. R.; PAJGADE, P. S.; NAGARNAIK, P. B. Experimental Study of Artificial Sand Concrete. 2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. Anais...IEEE, 2008
- COSTA, M. J. DA. Avaliação do uso da areia artificial em concreto de cimento Portland: aplicabilidade de um método de dosagem. [s.l.] Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2005.
- COSTA, N. L. B. A influência da substituição completa ou parcial do agregado miúdo natural por pó de pedra de origem vulcânica no concreto. [s.l.] Universidade de Fortaleza, 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Sistemas de Custos.
- DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K. DE; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. *Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 3, p. 399–408, 2009.
- IS 10262. IS: 10262 - 1982 : Indian Concrete mix design guide lines. Bureau of Indian Standard, New Delhi, v. 1982, 1982. IS 456. Code of practice for plain and reinforced concrete (third revision). Bureau of Indian Standards, New Dehli, p. 1–114, 2000.
- MEISUH, B. K.; KANKAM, C. K.; BUABIN, T. K. Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 8, n. December, p. 16-22, 2018.
- MOGRE, R. P.; PARBAT, D. K.; BAJAD, S. P. Feasibility Of Artificial Sand In Concrete. *International Journal of Engineering research and Technology*, v. 2, n. 7, p. 1606–1610, 2013.
- MORAIS, G. C. M. DE; OLIVEIRA, D. R.; RITT, H. Caracterização e aplicação de agregado miúdo britado em concreto de cimento Portland. *Perquirere*, v. 12, n. Julho, p. 226–238, 2015.
- NEVILLE, A. N. Propriedades do Concreto. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- POLUCHA, A. C. Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e fíler calcário como substituição parcial do cimento Portland. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2016.
- SALES, J. P. DE A. M. Utilização de areia artificial como substituição parcial ou total à areia natural em concretos e argamassas. [s.l.] Universidade de Fortaleza, 2019.
- SANTOS, C. C. DOS; ISAIA, G. C. Materiais alternativos para concretos de cimento portland. *Revista Tecnologia*, v. 41, n. 1, p. 1–13, 2020.
- SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO CEARÁ. Tabela de Custos.
- SHRUTHI, H. G.; PRASAD, G. An Experimental Study on Partial Replacement of Sand with Crushed Brick in Concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 7, n. 6, p. 7026–7030, 2018.
- TEODORO, S. B. Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural. Juiz de Fora: [s.n.]. TEYCHENNÉ, D. et al. Design of normal concrete mixes Second Edition. Dairy Science & Technology, CRC Taylor & Francis Group, n. June, p. 1–542, 1988. VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. p. 1–15, 2001.