

Análise da viabilidade técnica-financeira e econômica de argamassa produzida com areia artificial para estaca raiz

Analysis of the technical-financial and economic viability of mortar produced with artificial sand for root piling

Análisis de la Viabilidad Técnica-Financiera y Económica de Mortero Producido con Arena Artificial para Estaca Raiz

Resumo

A extração dos recursos naturais tem se mostrado por muitas décadas um dos maiores desafios da humanidade, sendo a construção civil uma das áreas que mais utilizam recursos naturais, e a exploração de agregados miúdos exemplos de danos irreversíveis que a mineração pode causar ao meio ambiente. Dentro da engenharia de fundações, as estacas do tipo raiz se diferem das demais pelo fato de serem injetadas com argamassa, pois são conhecidas por suportar elevadas cargas de trabalho e por seu consumo excessivo de argamassa. Diante da problematização apresentada, a pesquisa propôs como hipótese a substituição da areia natural por areia artificial britada, na composição do traço de argamassa para estaca tipo raiz. Foram realizados traços com 100% de areia natural, 100% de areia artificial e uma composição de 50% com dois tipos de areias, a fim de comparar suas propriedades físicas através de ensaio de absorção e mecânicos representados por ensaio de compressão e módulo de elasticidade, em amostras com diferentes idades 7, 14 e 28 dias. Os resultados demonstram que argamassas produzidas com areia artificial, além de apresentar valores superiores em todas as idades, melhora propriedades como resistência e rigidez, menor absorção capilar, e ainda possui viabilidade econômica, em relação aos agregados naturais.

Palavras-chave: areia natural e artificial; argamassa; ensaio de compressão; estaca raiz.

Abstract

The extraction of natural resources has been one of humanity's greatest challenges for many decades, with civil construction being one of the areas that use the most natural resources and the exploitation of small aggregates being examples of irreversible damage that mining can cause to the environment. Within foundation engineering, root piles differ from others because they are injected with mortar, as they are known for withstanding high workloads and for their excessive mortar consumption. Because of the problems presented, the research proposed the hypothesis of replacing natural sand with crushed artificial sand in the mortar mix composition for root piles. Traces were made with 100% natural sand, 100% artificial sand, and a 50% composition with two types of sand to compare their physical properties through absorption and mechanical tests represented by compression tests and modulus of elasticity in samples with different ages 7, 14, and 28 days. The results demonstrate that mortars produced with artificial sand improve properties such as resistance and rigidity, lower capillary absorption, and have economic viability compared to natural aggregates besides presenting superior values at all ages.

Keywords: natural and artificial sand; mortar; compression test; root pile.

Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva 
Universidade Nove de Julho
rodrigorogério@uni9.pro.br

Maeli S. Tavares 
Universidade Nove de Julho
maeli_tavares@hotmail.com

Resumen

La extracción de los recursos naturales viene mostrándose por muchas décadas uno de los mayores retos de la humanidad, siendo la construcción civil una de las áreas que más utilizan recursos naturales, y la explotación de agregados pequeños ejemplos de daños irreversibles que la minería puede causar al medio ambiente. Dentro de la ingeniería de cimentación, las estacas de tipo raiz se diferencian de las demás por el hecho de ser inyectadas con mortero, pues son conocidas por soportar grandes cargas de trabajo y por su consumo excesivo de mortero. Ante la problematización presentada, la investigación propuso como hipótesis la sustitución de la arena natural por arena artificial triturada, en la composición del trazo de mortero para estaca tipo raiz. Fueron realizados trazos con 100% de arena natural, 100% de arena artificial y una composición de 50% con dos tipos de arena, con el objetivo de comparar sus propiedades físicas por medio de ensayos de absorción y mecánicos representados por ensayos de compresión y módulo de elasticidad, en muestras con diferentes edades: 7, 14 y 28 días. Los resultados demuestran que morteros producidos con arena artificial, además de presentar valores superiores en todas las edades, mejora propiedades como resistencia y rigidez, menor absorción capilar, y aún posee viabilidad económica, en relación a los agregados naturales.

Palabras clave: arena natural y artificial; mortero; ensayo de compresión; estaca raiz.

1 Introdução

A extração dos recursos naturais tem se mostrado ao longo dos anos um dos maiores desafios da humanidade. A construção civil é o setor que mais utiliza recursos naturais, sendo os agregados miúdos produtos básicos mais utilizados. Entre os impactos negativos da extração de areia em leitos estão à possibilidade de contaminações da água e do solo, diminuição da permeabilidade e fertilidade do solo, estresse da fauna local por ruídos e pela diminuição de seu habitat, além da depreciação da qualidade da vida humana existente ao redor do local (CAMARINI; ISHIKAWA, 2002).

A construção das grandes obras de infraestrutura e predial nas últimas décadas tem sido um desafio para a engenharia de fundações, devido à necessidade de atender a transmissão de elevadas cargas e através da conscientização sobre o uso dos recursos naturais de maneira mais adequada e para o descarte de resíduos sólidos. Exemplo deste desafio na área de fundações especiais é a execução e aplicabilidade da técnica da estaca tipo raiz, cuja vantagem está relacionada ao processo executivo indicado em casos especiais como reforço de fundações, fundações de obras com vizinhanças sensíveis a vibrações ou poluição sonora, ou em terrenos com presença de rochas. Neste tipo de fundação profunda é injetada argamassa com resistências médias de 25 a 30 MPa, sendo uma de suas desvantagens o consumo excessivo de areia natural.

Devido ao alto consumo de areia natural na construção civil, Neville (1997) afirma que para minimizar custos com transporte da areia natural e atenuar o impacto ambiental causado por sua extração, a alternativa tem sido a produção de areia artificial através dos resíduos de pedreiras. Embora, ainda pouco utilizada no Brasil, a areia artificial tem sido um material de pouco estudo com o intuito de substituir totalmente a areia natural e avaliar suas propriedades mecânicas, bem como sua durabilidade para aplicação de argamassa com fim estrutural.

A literatura demonstra que países como Canadá e Israel têm obtido resultados satisfatórios na utilização da areia artificial em obras de grande porte como barragens. O uso ainda é restrito no Brasil devido à quantidade de material pulverulento em sua composição mesmo que a ABNT-NBR 7211 (2009) admita seu uso quando contiver granulometria igual ou superior a 4,75 mm.

Estudos realizados por Takashima et al. (1998), Sodré (2000), Bastos (2002), Silva et al. (2015), avaliaram a substitui o de forma parcial ou total de areia média a grossa natural em traços de concreto, demonstrando o aumento da resistência   compressão para concretos convencionais simples, com a utiliza o de p  de brita, apresentando valores acima de 20 MPa para amostras ensaiadas com 28 dias.

O conhecimento das características reológicas da argamassa com areia artificial para fins estrutural ainda encontra-se restrito no campo de pesquisas, fazendo-se necessário a compreensão de sua caracterização física e mecânica na substituição parcial ou total do agregado miúdo natural, sendo uma contribuição da pesquisa aumentar o banco de dados para argamassa para fim estrutural utilizado em fundações profundas.

Assim o objetivo da presente pesquisa é avaliar a viabilidade técnica, através das propriedades físicas, mecânicas e econômica, para produção de argamassa para injeção de estaca raiz, comparando as propriedades mecânicas sugerida pela ABNT-NBR 6122 (2019), através de amostras preparadas com areia natural e artificial, visando a substituição parcial ou total in loco do agregado miúdo natural.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Areia natural e artificial

De acordo com Barreto (2001) e Wagner (2002), o subsolo brasileiro é composto por depósitos minerais significativos, de grande importância para a economia brasileira. Conforme Sintoni (1994) são estabelecidas documentações para o licenciamento de um empreendimento de mineração bem como licença ambiental, alvará de funcionamento e análise de EIA/RIMA, visando à otimização de impactos ambientais até mesmo irreversíveis que a mineração pode causar.

A Tabela 1 compara os principais problemas decorrentes da extração de agregado miúdo nos principais estados brasileiros com maior consumo.

Tabela 1 - Principais problemas da extração de areia natural e ações preventivas.

Estado	Principais Problemas	Ações Corretivas e Preventivas
SP	Realização de produção de areia na região do Vale do Paraíba, acarretando a destruição local mata ciliar, turbidez e contaminação na água, conflitos através do uso e ocupação do solo local, além de acidentes nas rodovias provocado pelo fluxo intenso de transporte.	Realização intensa de atividades envolvendo estudos para alternativas do abastecimento e de transporte
RJ	Realização de produção de areia na região de Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à ocorrência desordenada de áreas alagadas.	Disciplinamento da atividade: estudos de alternativas de abastecimento

Fonte: Farias (2002)

Devido ao alto consumo de areia natural, Neville (1997) afirma que para minimizar custos com transporte da areia natural e atenuar o impacto ambiental causado por sua extração, a alternativa tem sido a produção de areia artificial através dos resíduos de pedreiras. Embora, ainda pouco utilizada no Brasil, a areia artificial tem sido um material de pouco estudo com o intuito de substituir totalmente a areia natural e avaliar suas propriedades mecânicas, bem como sua durabilidade para aplicação de argamassa com fim estrutural.

Países como Canadá e Israel têm obtido resultados satisfatórios na utilização da areia artificial em obras de grande porte como barragens. O uso ainda é restrito no Brasil devido à quantidade de material pulverulento em sua composição mesmo que a ABNT-NBR 7211 (2009) admita seu uso quando contiver granulometria igual ou superior a 4,75 mm.

Estudos realizados por Silva et al. (2005) e Barbosa; Coura; Mendes (2008), comprovam que o grau de angulosidade da areia e presença de finos interferem no consumo de água, os pesquisadores também verificaram que a absorção de água nos concretos com rocha de gnaiss triturada aumentou 21% quando comparada ao concreto de agregado miúdo natural.

A areia natural por ter uma angulosidade mais arredondada e mais lisa pode acarretar fissuras entre a argamassa diminuindo assim o módulo de elasticidade. Ensaio realizados por Barbosa; Coura; Mendes (2008) demonstra que as utilizações de rochas de rejeitos de gnaiss e de mármore triturado em materiais cimentícios aumentaram a resistência à compressão axial em cerca de 9% a 14% respectivamente, quando comparados com areia natural.

De acordo com Barbosa et al. (2015) para uma melhor trabalhabilidade e homogeneização para areia artificial é necessário acrescentar água, o que diminui sua resistência, sendo uma alternativa para melhorar a trabalhabilidade a utilização de aditivos.

2.2 Características da estaca tipo raiz

A denominação estacas escavadas injetadas incluem vários tipos de estacas moldadas *in loco*, através de diferentes técnicas. A norma ABNT-NBR 6122 (2019) define como estaca raiz a fundação com fuste argamassado, com aplicação de pressão de ar comprimido, durante a retirada do tubo de perfuração, usando-se pressões baixas (inferiores a 0,5 MPa) que visam apenas garantir a integridade da estaca. A limpeza interna do furo é realizada através de uma composição de lavagem, introduzida até a cota inferior da estaca, sendo considerada concluída quando a água de retorno não apresentar presença de material transportável. A injeção ascendente deve ser interrompida apenas quando a argamassa emergente sair limpa, sem sinais de contaminação com lama ou detritos na boca do furo, devendo o tubo ser preenchido até que atinja a superfície do terreno, a figura 1 ilustra a seqüência executiva da estaca tipo raiz para realização da presente pesquisa.

Figura 1 - Processo executivo da estaca injetada tipo raiz (a) vista geral perfuração e colocação da armadura, (b) injeção com argamassa da estaca raiz.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

3 Metodologia

3.1 Amostragem

A amostragem foi composta no total de 54 corpos de prova de 100 x 200 mm de argamassa *moldadas in loco*, segundo as especificações da norma ABNT- NBR 5738 (2016). Foram confeccionados 18 repetições para ensaiar nas idades de 7, 14 e 28 dias com as seguintes características: 100% de areia natural (CPN), 100% de areia artificial (CPA), e 50% de areia natural e 50% de areia artificial (CPNA), considerando a mesma relação *a/c* (água/cimento). A variação da idade da amostragem contribuirá para a criação de modelos de correlações entre resistência mecânica e idade dos corpos de prova de argamassa, através do desempenho de cada tipo de agregado miúdo.

3.2 Características dos materiais

Para confecção dos traços realizados *in loco* foi utilizada água potável, cimento Portland do tipo CP II-E-32, comumente utilizado em elementos estruturais, agregado miúdo natural quartzoso (areia média lavada) figura 2 (a), e agregado miúdo artificial de origem mineralogia granítica, escolhido devido ser um dos mais abundantes do Brasil figura 2 (b).

Figura 2 - Agregado miúdo utilizado, (a) areia natural, (b) areia artificial granítica.



Fonte: Autoria própria (2022).

A caracterização dos agregados foi realizada segundo as recomendações das normas para agregado miúdo ABNT-NBR (NM 248:2003; NM 52:2009; NM 45:2006, NM 30:2001), estando os resultados conforme tabela (2) dentro dos limites de aceitabilidade, de acordo à NBR 7211:2009.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados miúdos (NM 248:2003).

Peneira abertura (mm)	% de material retido acumulado		
	Natural	Artificial	Natural + Artificial
4,8	0	0	0
2,4	4	3	3
1,2	15	35	21
0,6	36	57	51
0,3	78	71	77
0,15	99	87	98
Fundo	100	100	100
Diâmetro máximo (mm)	2,4	2,4	2,4
Módulo de Finura	2,32	2,53	2,50
Massa específica (kg/dm ³) - (NM 52:2009)	2,62 kg/dm ³	2,70 kg/dm ³	2,65 kg/dm ³
Massa unitária (kg/dm ³) - (NM 45:2006)	1,45 kg/dm ³	1,55 kg/dm ³	1,52 kg/dm ³
Material pulverulento (NM 46/2001)	0,84 %	0,92 %	0,76 %
Absorção (%) – (NM 30:2001)	0,63	0,42	0,51
Teor de umidade %	7,8	4,5	5,6
Classificação	Zona ótima	Zona ótima	Zona ótima

Fonte. Autoria própria (2022).

3.3 Preparação e características do concreto dos corpos de prova

De acordo com ABNT-NBR 6122 (2019) a resistência mínima de argamassa para estaca raiz é de 20 MPa aos 28 dias, para consumo mínimo de cimento da ordem de 600 kg/m³, para relação a/c entre 0,5 a 0,6. O traço básico utilizado seguiu as recomendações de Silva (2018) para dosagem realizada in loco, ao qual possui as seguintes proporções entre os seguintes materiais (50 Kg de cimento, 65 litros de areia média á grossa e 30 litros de água, representando a relação água/cimento de 0,6).

Como a argamassa possui fim estrutural os ensaios realizados no estado plástico foram realizados seguindo os parâmetros ABNT-NBR 15823-4 (2017) para CAA (Concreto auto adensável), através de *Slump-Flow*. Não foi utilizado nenhum tipo de aditivo durante a confecção dos traços experimentais, sendo que após um período

de 24 horas os corpos de prova de argamassa foram curados ao ar livre, protegidos contra ações climáticas durante o período de 7, 14 e 28 dias até a realização dos ensaios. Após a moldagem dos corpos de prova de dimensões (100 de altura x 200 mm e diâmetro) realizados *in loco*, no período de 7, 14 e 28 dias, a massa das amostras foi determinada por pesagem em balança de precisão com resolução de 0,1 g e as dimensões mensuradas com paquímetro digital para o cálculo do volume e, assim, as densidades dos corpos de prova foram calculadas.

Após os 28 dias foi realizado o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade definido pela ABNT-NBR 9779 (2012). Foram colocadas três amostras para cada tipo de areia em recipiente submetidos a temperatura ambiente de modo que ficassem afastadas do fundo e o nível de água permanecesse constante a (5 ± 1) mm acima de face inferior do corpo de prova. As massas dos corpos de prova para as leituras para 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Após a última pesagem, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, conforme especificação da ABNT-NBR 7222 (2011), de modo a permitir a verificação da distribuição de água em seu interior, de acordo com a equação 1.

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{D.L} \quad (1)$$

Onde: $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral; F = força máxima alcançada (N); D = diâmetro do corpo de prova (mm); L = comprimento do corpo de prova (mm).

3.4 Ensaios estáticos de compressão

Os ensaios foram realizados em máquina hidráulica, seguindo as especificações de acordo norma brasileira, sendo realizado para cada 6 amostras ensaio de resistência característica à compressão (f_c) calculado de acordo com a equação (2) sugerido pela ABNT-NBR 5739 (2018). Os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros de resolução de 0,01 mm, para a determinação do módulo de elasticidade (E_{ci}) calculado de acordo com a norma brasileira "ABNT-NBR 8522 (2017) equação (3).

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (2)$$

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (3)$$

Onde: f_c = Resistência à compressão do corpo de prova (MPa); F = força máxima alcançada (N); D = diâmetro do corpo de prova (mm); σ_b = tensão (MPa) obtida com 30% da resistência à compressão; 0,5 = valor da tensão de referência inicial (MPa); ε_b e ε_a = deformações específicas do concreto sob a tensão correspondente a 30% da resistência à compressão e sob a tensão de referência inicial, respectivamente.

4 Resultados e discussão

4.1 Propriedades físicas e mecânicas das amostras

As densidades médias das argamassas produzidas variaram de acordo com os diferentes tipos de areia, devido seus pesos específicos e capacidade de absorção água e teor de umidade, interferindo em sua plasticidade conforme apresentada pelo *Slump Flow* (figura 3), utilizando tronco de cone ABNT-NBR NM 67 (1998). A Tabela 3 demonstra os valores do *Slump Flow* antes da realização da moldagem das amostras e as respectivas densidades dos corpos de provas nos períodos de 7, 14 e 28 dias. A elaboração dos traços procurou manter sempre a mesma metodologia de dosagem realizada *in loco*, não houve a correção do teor de umidade, considerando a água contida no agregado miúdo para verificar sua influência na trabalhabilidade e resistência da argamassa.

Tabela 3 - Valores de *Slump Flow* e densidade média das argamassas de diferentes tipos de extração.

Tipo de areia	<i>Slump Flow</i>	Densidade média CP (kg.m ⁻³)		
	(mm)	7 dias	14 dias	28 dias
CPN (areia natural)	780	2043	2127	2156
CPA (areia artificial)	680	2189	2195	2208
CPNA (areia natural e artificial)	720	2140	2178	2192

Fonte. Autoria própria (2022).

Figura 3 - *Slump Flow* das argamassas: (a) 100% de areia artificial, (b) 100 % de areia artificial, (c) 50% de areia natural e 50% de artificial.



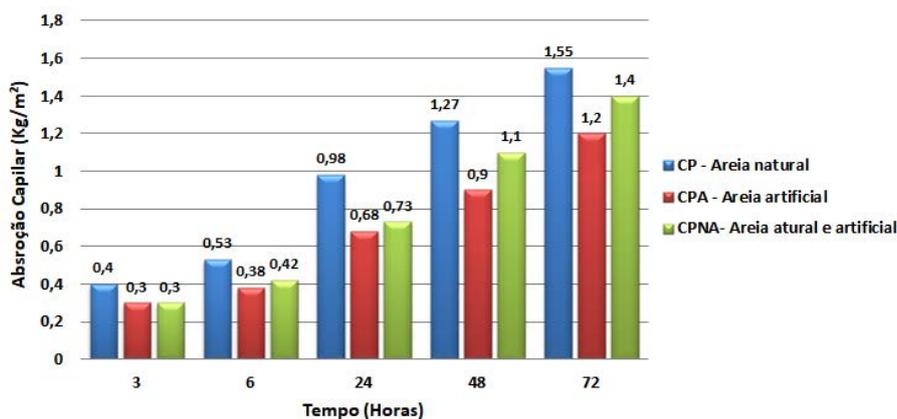
Fonte. Autoria própria (2022).

Apesar das variações, os valores de todas as densidades estão dentro dos limites considerados normais para argamassa, de 2000 kg.m⁻³ a 2800 kg.m⁻³, segundo norma brasileira ABNT-NBR 9778 (2015). Em relação aos valores do ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*) obtidos na Tabela 3, a ABNT-NBR 15823-2 (2017) classifica a argamassa de areia natural como SF 3 (entre 760 mm a 850 mm), indicada para estruturas com alta densidade de armadura.

A areia artificial enquadra-se na classe SF 1, sugerido pela norma como uma argamassa específica para fundações profundas e com baixa taxa de armadura. Em relação à consistência das argamassas avaliada pelo *Slump Flow Test*, observou-se que as argamassas com areia de britagem, absorveram maior quantidade de água reduzindo a trabalhabilidade em função do elevado teor de finos (material pulverulento).

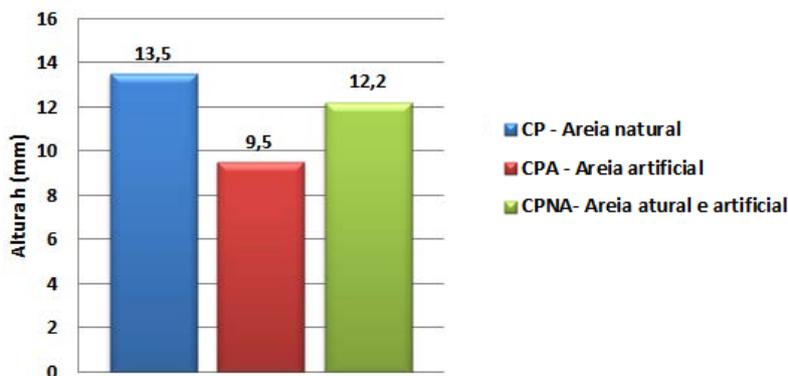
A figura 4 demonstra os resultados médios da absorção capilar pelo método ABNT-NBR 9779 (2012), analisados em 3 corpos de prova de cada espécie de areia, avaliado nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Também são expostos os resultados médios da altura máxima (h) que a água atingiu no interior do corpo de prova, representado pela figura 5.

Figura 4 - Resultados de absorção capilar para as argamassas produzidas com 100% de areia natural, 100% de areia artificial e 50% areia natural e 50% de areia artificial.



Fonte. Autoria própria (2022).

Figura 5 - Altura média d' água dos corpos de provas de argamassas produzidos com 100% de areia natural, 100% de areia artificial e 50% areia natural e 50% de areia artificial.



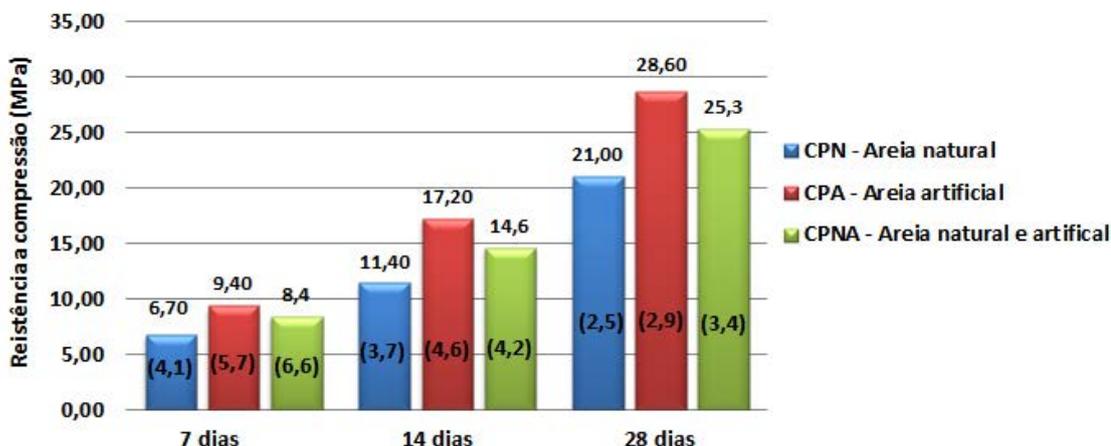
Fonte. Autoria própria (2022).

Observa-se que a absorção capilar para a areia artificial de brita é em geral de 25 a 30% menor em relação à amostra natural, demonstrando que a distribuição granulométrica da areia artificial com maior representação na zona ótima e a maior concentração de material pulverulento contribuem para menor absorção. Camarini e Ishikawa (2002), também chegaram à mesma conclusão em seus estudos, demonstrando que a argamassa produzida com agregado miúdo artificial melhora a plasticidade, diminui o teor de ar aprisionado e contribui para o aumento da massa específica.

A baixa massa específica da areia natural de acordo com a Tabela 3 contribuiu para a maior absorção. Segundo Silva; Buest; Campiteli (2005) para argamassa produzida com areia de baixa massa específica, possui maior teor de ar aprisionado contribuindo para maior absorção.

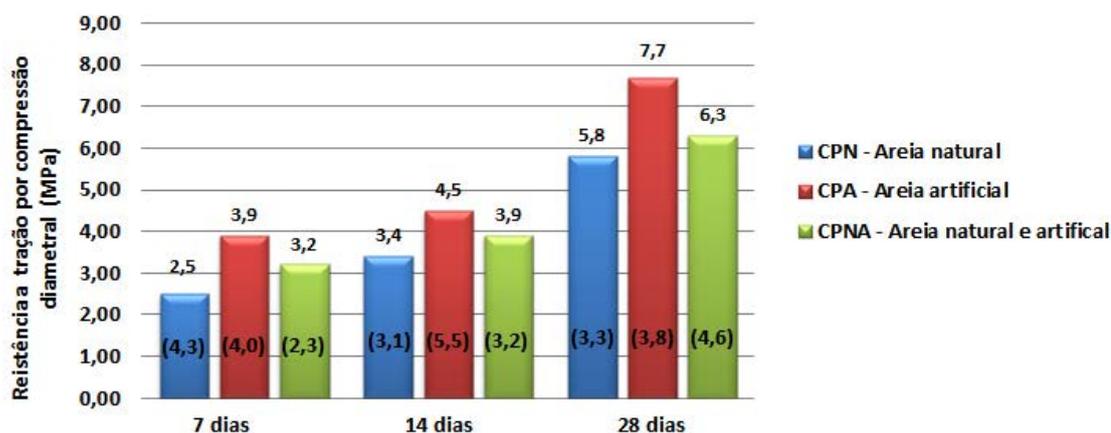
As Figuras 6, 7 e 8 indicam os resultados médios da resistência à compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$) e módulo de elasticidade (E_{ci}) das amostras produzidas com areia natural e artificial.

Figura 6 - Resultados obtidos para ensaio de resistência à compressão simples (f_c) para os corpos de provas CPN – areia natural, CPA – areia artificial e CPNA – areia natural e artificial. Onde: Valores em parênteses representam o coeficiente de variação das amostras.



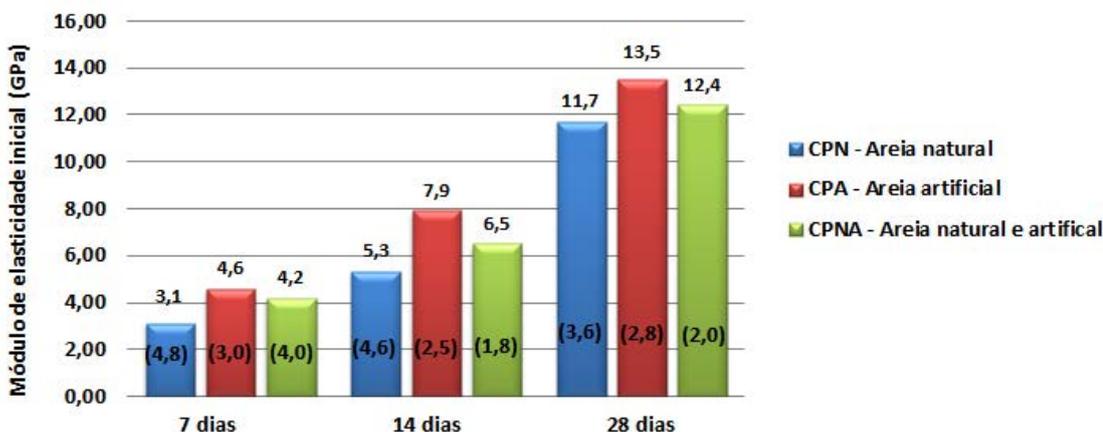
Fonte. Autoria própria (2022).

Figura 7 - Resultados obtidos para ensaio de resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$) para os corpos de provas CPN – areia natural, CPA – areia artificial e CPNA – areia natural e artificial. Onde: Valores em parênteses representam o coeficiente de variação das amostras.



Fonte. Autoria própria (2022).

Figura 8 - Resultados obtidos para módulo de elasticidade (E_c) para os corpos de provas CPN – areia natural, CPA – areia artificial e CPNA – areia natural e artificial. Onde: Valores em parênteses representam o coeficiente de variação das amostras.



Fonte. Autoria própria (2022).

O módulo de finura e a distribuição granulométrica da areia artificial permite o maior preenchimento dos espaços vazios entre as partículas da argamassa, tendo, assim, um empacotamento dos grãos resultando um aumento tanto na resistência à compressão quanto à tração. Ensaios realizados por Barbosa; Coura; Mendes (2008) demonstram que a utilização de rochas de rejeitos de gnaiss e de mármore triturado em materiais cimentícios, aumenta a resistência à compressão axial em cerca de 9% a 14% respectivamente, quando comparados com areia natural.

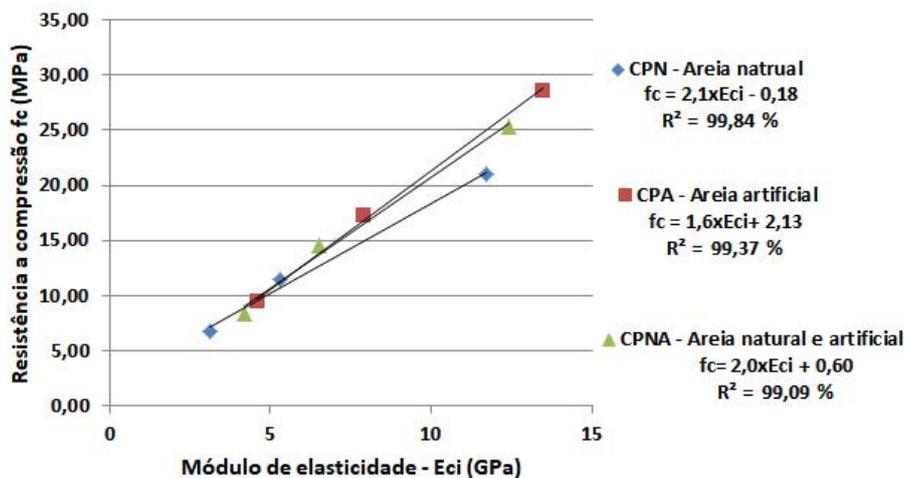
O aumento da resistência está associado à diminuição da absorção, determinando que independentemente do teor de substituição uma maior compacidade da argamassa permite a obtenção de resistências mais elevadas. De acordo com Fabro et al. (2011) a superioridade das resistências das argamassas com areia artificial pode ser atribuída maior diminuição dos poros, ocasionado pela presença de material fino pulverulento, encontrados junto ao pó-de-pedra. Outro fator é a forma irregular dos grãos obtidos durante a britagem, segundo Bajad; Sakhare (2018) a irregularidade favorece um melhor empacotamento entre as partículas, reduzindo os vazios em argamassas.

A variabilidade dos resultados através do coeficiente de variação indica a baixa variabilidade dos resultados, onde em geral para valores inferiores a 25%, a amostragem é considerada aceita estatisticamente, os valores de coeficiente de variação foram os mesmos encontrados por Barbosa et al. (2015) na preparação de argamassas com pó de mármore em substituição areia natural, avaliando os parâmetros de resistência e rigidez.

A partir dos ensaios realizados pode-se concluir que a porosidade da pasta de cimento apresenta-se como fator fundamental na variabilidade do módulo de elasticidade, pois a maior presença do teor de umidade para areia artificial favorece aumento da porosidade, com maior ocorrência de microfissuras durante os ensaios reduzindo, assim o módulo de elasticidade. A areia natural por ter uma angulosidade mais arredondada e mais lisa pode acarretar fissuras entre a argamassa diminuindo assim o módulo de elasticidade.

A figura 9 apresenta os resultados das argamassas avaliadas correlacionando os valores de resistência a compressão das argamassas (f_c) com módulo de elasticidade inicial (E_{ci}), demonstrando correlações altamente significante com coeficiente de regressão R^2 acima de 99% para todas as amostras ensaiadas com diferentes tipos e quantidades de agregados miúdo.

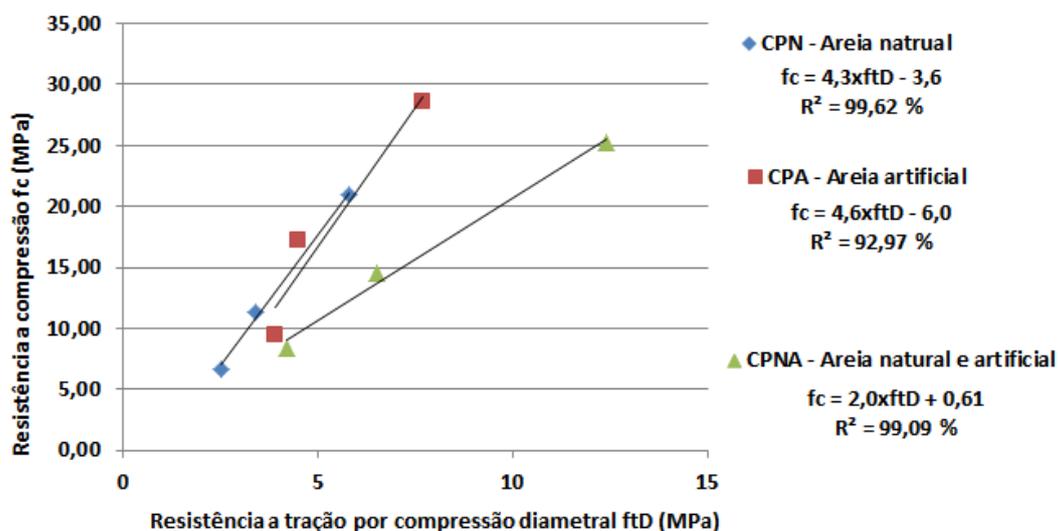
Figura 9 - Correlação entre a resistência à compressão simples (f_c) e módulo de elasticidade (E_{ci}) para os corpos de provas CPN – areia natural, CPA – areia artificial e CPNA – areia natural e artificial.



Fonte. Autoria própria (2022).

Observando-se a figura 10, nota-se que a correlação resistência à compressão (f_c) e resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$), para amostras de argamassas CPN – areia natural e CPNA – areia natural e artificial, com um coeficiente de correlação R^2 acima de 99% %, apesar da amostra CPA – areia artificial possuir correlação R^2 de 92,97%, as duas variáveis de resistência são altamente significante.

Figura 10 - Correlação entre a resistência à compressão simples (f_c) e resistência a tração por compressão diametral ($f_{t,D}$), para os corpos de provas CPN – areia natural, CPA – areia artificial e CPNA – areia natural e artificial.



Fonte. Autoria própria (2022).

4.2 Viabilidade financeira com areia artificial

Do ponto de vista financeiro, o uso da utilização da areia artificial na produção de argamassa para estaca do tipo raiz, pode trazer benefícios não somente para as construtoras, mas também para as cidades, em função da redução dos impactos ambientais. Uma das grandes vantagens da areia artificial é que a sua produção é realizada em pedreiras localizadas próximas aos grandes centros urbanos, reduzindo o seu custo em função de sua logística.

A tabela 4 apresenta um comparativo dos custos por m^3 dos agregados miúdo de origem natural e artificial, através de quatro fornecedores localizados na região metropolitana de São Paulo, com o objetivo de reduzir a influência dos custos referentes ao frete destes materiais, permitindo melhor comparação entre os preços levantados.

Tabela 4 - Comparativo de custos entre areia natural e artificial na cidade de São Paulo

Tipo de Agregado	Preço dos Fornecedores por região R\$/ m^3				Análise estatística		
	Zona Norte	Zona Leste	Zona Oeste	Zona Sul	Média R\$/ m^3	Desvpad	C.V (%)
Areia natural	160,00	168,00	172,00	175,00	170,00	6,5	3,9
Areia artificial	135,00	131,00	137,00	139,00	136,00	3,4	2,5

Onde: Desvpad (Desvio Padrão); C.V (coeficiente de variação).

Observação: valores obtidos em relação ao 2º semestre de 2020.

Fonte. Autoria própria (2022).

Os resultados indicam que o agregado miúdo artificial britado além de melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, também contribui com a viabilidade econômica, por meio da comparação de preços entre os agregados naturais, representando uma economia em torno de 20%. Oferecendo as empresas especializadas em fundações especiais uma alternativa diferente do emprego apenas da areia natural na confecção de argamassa para estaca do tipo raiz.

5 Conclusão

A utilização de areia artificial possui contribuição ambiental pelo fato de sua utilização eliminar um rejeito do processo de britagem dando um fim adequado, reduzindo os danos causados pela exploração, não encontrado na produção da areia natural nos leitos.

Quanto ao ensaio de Slump Flow, considerando o mesmo traço, variando-se o tipo agregado miúdo e mantendo a mesma proporção, constatou-se que a produção de argamassa apresentou espalhamento que aumentava conforme fosse utilizando agregados miúdos com maior teor de umidade e menor quantidade de material pulverulento finos.

O aumento dos parâmetros mecânicos para areia artificial está associado à diminuição da absorção atribuída ao maior fechamento dos poros proporcionado pela concentração de material pulverulento, independentemente do teor de substituição, uma maior compacidade da argamassa permite a obtenção de resistências mais elevadas.

A vantagem econômica da utilização da areia artificial está no valor unitário do metro cúbico garantindo a elaboração de uma composição de preço com custos mais baixos, comparando-se a uma composição de preço de argamassa estrutural confeccionado apenas com areia natural de rio.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**: agregado miúdo: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT. 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT. 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: argamassa e concretos endurecidos: determinação da absorção da água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-2**: concreto auto-adensável. Parte 2: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento: método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-4**: concreto auto-adensável. Parte 4: determinação da habilidade passante: método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação a compressão. Rio de Janeiro: ABNT. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT. 2019.
- BAJAD, M. N.; SAKHARE, Sarang. Influence of artificial sand on the properties of concrete and mortar. **Technology**, v. 9, n. 1, p. 447-454, 2018.
- BARBOSA, R. A; ALVARENGA, R. C. S. S; JUNIOR, A. N. C; FERREIRA, R. T. L., RODRIGUES, L. M., CASTRO; L. O., GARCIA, R. B; SANTOS, J. Análise Comparativa de Métodos de Obtenção do Módulo de Elasticidade para Concreto Preparado com Areias Natural e Artificial. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, [s. l.], v. 1, n. 24, p. 151-161, jan./jun. 2015.
- BARBOSA, M. T. G., COURA, C. V. G., MENDES, L. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 51-60, out./dez. 2008.
- BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215p.
- BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002.
- CAMARINI, G., ISHIKAWA, P. H. Propriedade de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, Brasília. **Anais [...]**. Brasília : Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. Extração de areia. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>.
- FABRO, F., GAVA, G. P; GRIGOLI, H. B; MENEGHETTI, L. C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, [s. l.], v. 4 , n. 2, p. 191-212, 2011.
- FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**: PNUD - Contrato 2002/001604. 2002. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação: CGEE, 2002.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.
- REIS, F. A. G. V; FRANCO, A. C. M.; PERES, C. R.; BRONZEL, D.; RAFAELA, E.; PONTES, F. F. F.; GUIZARD, J.; RAFALDINI, M. E.; GIORDANO, L.C. Diagnóstico Ambiental Em Minerações De Areia E Argila No Rio Jaguari Mirim, Município De São João Da Boa Vista. **Engenharia ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 2, n. 1, p.115-134, jan/dez, 2005.
- SILVA, L. S.; DEMETRIO, J. C. C; DEMETRIO, F. J. C. Concreto Sustentável: Substituição da Areia Natural por Pó de Brita para Confecção de Concreto Simples. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION – ACADEMIC WORK, 5., São Paulo. 2015. **Anais [...]**. São Paulo: UNIP, 2015.
- SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 6, 2005, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis. CD ROM. 2005. p. 12-22
- SILVA, R. R. C. da. Previsão da capacidade de carga em estaca raiz através de métodos-semi empíricos associados a análises estatísticas. **Revista CIATEC-UPF**, [s. l.], v. 10, n. 2. 2018.

SINTONI, A. A mineração no cenário do município de São Paulo: mercado e novas tecnologias. *In*: ENCONTRO DE MINERAÇÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 1., 1994, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: Secretaria das Administrações Regionais da Prefeitura do Municipal de São Paulo, 1994. p.31-42.

SODRÉ, J. R. **Caracterização Tecnológica das Areias Naturais e Artificiais de Campo Grande – MS. Florianópolis**. 2000. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

TAKASHIMA, S.; BAUER, R.; J. F.; CURTI, R. Estudo de Concretos Preparos com Agregado Miúdo Artificial e Areia Silicosa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. ; REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 1998, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Leblon, 1998.

WAGNER, A. A eleição presidencial e a mineração. **Gazeta Mercantil**, São Paulo, 20 de set. 2002.

Sobre os autores

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva

Pós-doutorado pela Universidade Estadual de Campinas, Doutorado em Inspeção de Estruturas por ensaios não destrutivos pela Universidade Estadual de Campinas, Mestrado em Fundações pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Especialista em Geotecnia pelo Instituto de Ensino Superior da Região Serran, Especialista em Docência do Ensino Superior pela Universidade Municipal de São Caetano do Sul e Formação Pedagógica de Docentes pela Universidade Nove de Julho, Engenheiro Civil. Tem experiência na área de engenharia civil, com ênfase em fundações e obras de terra, tratamento de solos moles e inspeção de materiais e estruturas por meio de ensaios não destrutivos pelo método de ultrassom. Possui experiência na educação superior, atuando principalmente com a aplicação de metodologias ativas de ensino-aprendizagem, aprendizagem baseada em problemas (PBL) e avaliação do desempenho de estudantes.

Maeli S. Tavares

Especialista em Geotecnia pela Universidade Nove de Julho, Engenheira Civil pela Universidade Nove de Julho e Experiência em análise de projeto estrutural e modulação prévia de laje alveolar com intuito de desenvolver negócios que atenda ao requisito técnico e econômico.

Avaliado em: 10.05.2022

Aceito em: 11.09.2023