XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9000

# Análise do desempenho do concreto com substituição parcial e total do agregado miúdo por resíduo de brita

## Performance analysis of concrete with partial na total replacemente of fine aggregate by crushed stone waste

**Moacir Braz da Silva Neto**
Instituto federal da Paraíba | Cajazeiras | Brasil | moacir.neto@academico.ifpb.edu.br
**Alex Cauã Oliveira Araújo**
Instituto federal da Paraíba | Cajazeiras | Brasil | alex.caua@academico.ifpb.edu.br
**Robson Arruda dos Santos**
Instituto federal da Paraíba | Cajazeiras | Brasil | robson.santos@ifpb.edu.br
**Kauã Cavalcante de Oliveira**
Instituto federal da Paraíba | Cajazeiras | Brasil | kaua.cavalvante601@gmail.com

**Resumo**

A construção civil é responsável pelo elevado consumo de recursos naturais e pela geração de resíduos, como o pó de pedra proveniente da britagem. Nesse contexto, este estudo analisa a viabilidade da substituição parcial e total da areia natural por resíduo de britagem como agregado miúdo no concreto, avaliando propriedades mecânicas e de durabilidade. Foram produzidos concretos com substituições de 0%, 40%, 50% e 100%, submetidos a ensaios de resistência à compressão, tração, migração de cloretos e potencial de corrosão. Os resultados mostraram que a substituição total apresentou melhor desempenho, com aumento de 8,3% na resistência à compressão e maior resistência à penetração de cloretos, enquanto a substituição de 40% apresentou reduções significativas. Conclui-se que a areia artificial de britagem é uma alternativa técnica e economicamente viável para concreto estrutural, destacando-se as substituições de 50% e 100% pelo equilíbrio entre desempenho e sustentabilidade.

Palavras-chave: Agregado reciclado. Durabilidade. Construção civil. Resíduo de britagem.

**Abstract**

*The construction industry is a major consumer of natural resources and a significant generator of waste, such as stone dust produced from crushing processes. In this context, this study analyzes the feasibility of partially and fully replacing natural sand with crushed stone waste as fine aggregate in concrete, evaluating its mechanical and durability properties. Concrete mixtures with replacement levels of 0%, 40%, 50%, and 100% were produced and subjected to compressive strength, tensile strength, chloride migration, and reinforcement corrosion potential tests. The results showed that total replacement provided the best performance, with an 8.3% increase in compressive strength and greater resistance to chloride penetration, whereas the 40% replacement presented significant reductions. It was concluded that crushed stone sand is a technically and economically viable alternative for structural concrete production, with 50% and 100% replacement levels showing the best balance between performance and sustainability.*

*Keywords: Recyclad aggregate. Durability. Civil construction. Quarry residue.*

Como citar:
SILVA NETO, M. B. et al. Análise do desempenho do concreto com substituição parcial e total do agregado miúdo por resíduo de brita. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

## INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais, tendo o concreto como um dos principais materiais utilizados, com alto impacto no consumo global de recursos [1]. O desempenho do concreto está diretamente ligado à sua composição e à dosagem dos materiais, especialmente dos agregados, sendo possível melhorar suas propriedades pela redução de vazios na mistura [2]. Nesse contexto, a areia natural, amplamente utilizada como agregado miúdo, é obtida principalmente por extração em leitos de rios, atividade que gera impactos ambientais significativos, como assoreamento e degradação de ecossistemas.

Como alternativa, destaca-se o pó de pedra, resíduo da britagem com partículas inferiores a 4,75 mm, frequentemente descartado de forma inadequada e associado à geração de impactos ambientais, como poeira [3]. Apesar de apresentar diferenças em relação à areia natural, como maior angularidade e superfície mais irregular [4], estudos indicam que o material pode ser utilizado como substituto parcial ou total na produção de concreto, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e do descarte de resíduos.

Dessa forma, este trabalho avaliou a substituição da areia natural por pó de pedra nas proporções de 0%, 40%, 50% e 100%, mantendo constante o consumo de cimento. Foram analisadas propriedades mecânicas e de durabilidade, como resistência à compressão, tração diametral, migração de cloretos e potencial de corrosão da armadura, com o objetivo de verificar a viabilidade técnica do uso do pó de pedra em concretos estruturais, associando desempenho e sustentabilidade.

## MÉTODO DE PESQUISA

### DOSAGEM DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A dosagem dos concretos foi definida pelo método de empacotamento de partículas, considerando substituições de 40%, 50% e 100% da areia natural (AN) por pó de pedra (PP), além de um traço de referência sem substituição. Para cada composição, foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 × 20 cm) e cúbicos (8 × 8 cm), armazenados conforme as exigências de cada ensaio. Nos ensaios de resistência mecânica e durabilidade, os corpos de prova foram curados em água com hidróxido de cálcio até 28 dias. O ensaio de migração de cloretos foi realizado de acordo com a NT Build 492 [5].

O método de empacotamento de partículas foi utilizado para otimizar a distribuição granulométrica dos materiais, buscando uma matriz mais densa, homogênea e com menor índice de vazios. O modelo adotado seguiu o método adotado por [2], baseado no preenchimento progressivo dos vazios entre partículas de diferentes tamanhos. As proporções ideais foram determinadas com auxílio do software Q-Mix, que utiliza programação linear e dados granulométricos experimentais para minimizar o desvio em relação à curva teórica ideal, medido pela Soma Residual dos Quadrados (RSS). Dessa forma, foi possível obter concretos com substituição parcial e total da areia

natural por pó de pedra, mantendo boa compacidade e desempenho mecânico e de durabilidade.

### ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova moldados conforme a NBR 5738 [6] foram curados e, posteriormente, tiveram suas faces retificadas para garantir a regularidade e a perpendicularidade das bases. Em seguida, foram submetidos à compressão em prensa hidráulica até a ruptura.

### MIGRAÇÃO DE CLORETOS

O ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário foi realizado conforme a NT Build 492 [5], utilizando células de PVC para acomodação dos corpos de prova cilíndricos, previamente saturados e com as faces laterais vedadas para garantir o fluxo unidirecional de íons (Figura 01).

Ao final do procedimento, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral e suas superfícies tratadas com nitrato de prata ($AgNO_3$), permitindo a identificação da profundidade de penetração de cloretos. Com esses resultados, foi determinado o coeficiente de migração de cloretos em estado não estacionário.

**Figura 1: Ensaio de migração de cloretos.**



Fonte: o autor.

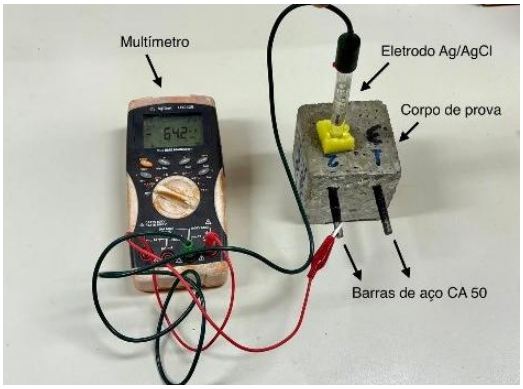
### TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração do concreto foi determinada por meio do ensaio de tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 [7], utilizando corpos de prova cilíndricos curados por 28 dias. As amostras foram submetidas a carregamento diametral contínuo em prensa até a ruptura, sendo a resistência calculada a partir da carga máxima registrada, conforme a norma. Os resultados foram utilizados para comparação do desempenho entre os diferentes traços de concreto.

### POTENCIAL DE CORROSÃO

O ensaio de corrosão foi realizado seguindo o processo descrito na norma C876-09 [8]. Os corpos de prova cúbicos foram deixados em câmara úmida por 7 dias e, após esse período, com auxílio de um multímetro, foram aferidas as resistências para cada corpo de prova por um período de 35 dias. Para isso, o polo positivo do multímetro foi ligado a barra e o polo negativo ligado a superfície do concreto utilizando um eletrodo de referência Ag/AgCl, como descrito na Figura 2.

**Figura 2: Ensaio de corrosão da armadura.**




Fonte: o autor.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção tem por finalidade a apresentar os resultados obtidos com os ensaios realizados na metodologia desse trabalho.

### DOSAGEM DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a caracterização dos agregados, foram adquiridos o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e o aditivo superplastificante ADVA Cast 525, a fim de melhorar a trabalhabilidade do concreto e a dispersão das partículas, visto o menor volume de vazios intergranulares.

Após final da terceira etapa de utilização do Q-Mix, os traços obtidos foram classificados da seguinte forma:

- traço com 100% de substituição de AN por PP (T100P);

- traço com 100% de utilização de AN (TA100);

- traço com substituição apenas da AN fina por PP fino (TPF);

- traço com 40% de substituição de AN por PP (T40);

- traço com 50% de substituição de AN por PP (T50).

Os traços utilizados encontram-se na Tabela 1.

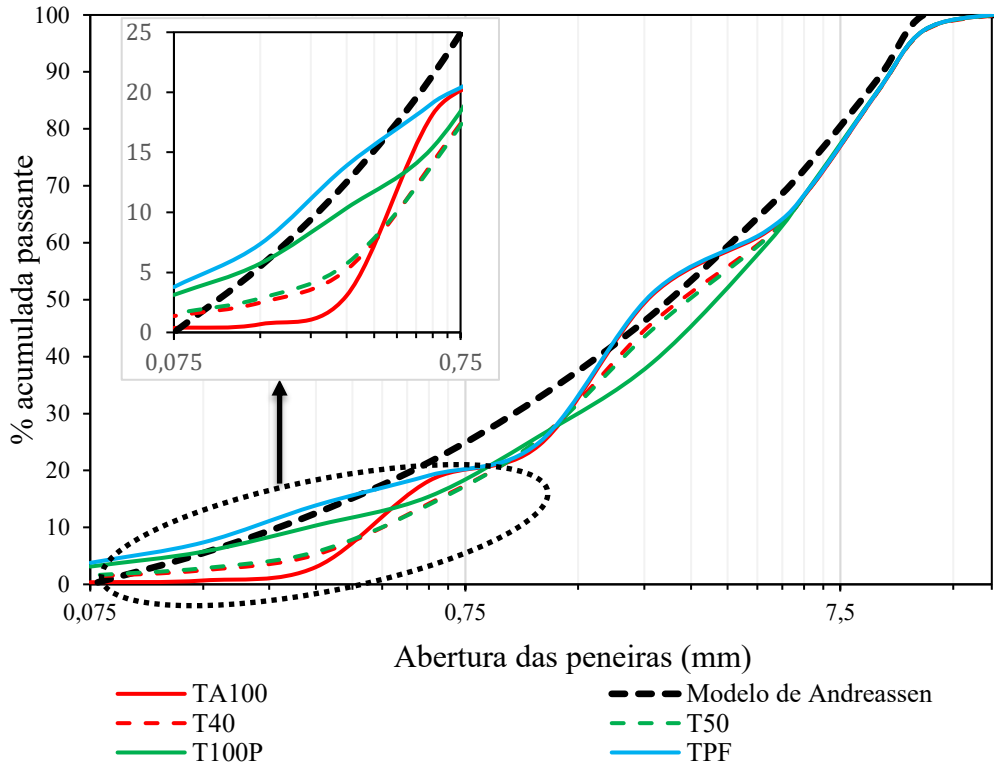
**Tabela 1: Mistura de concreto**

| COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS DOS CONCRETOS (kg/m³) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traço | C | AFN | AFA | AMN | AMA | AGN | AGA | Brita | Água | Aditivo |
| T100P | 437,80 | - | 218,93 | - | 210,17 | - | 446,62 | 875,70 | 210,20 | 0,022 |
| T100A | 437,80 | 306,48 | - | 78,81 | - | 472,85 | - | 875,70 | 210,20 | 0,022 |
| TPF | 437,80 | - | 315,70 | 78,82 | - | 472,89 | - | 875,70 | 210,20 | 0,022 |
| T40 | 437,80 | 109,45 | 94,57 | 105,07 | 106,67 | 223,38 | 227,54 | 875,70 | 210,20 | 0,022 |
| T50 | 437,80 | 131,35 | 80,21 | 126,10 | 77,09 | 267,96 | 182,05 | 875,70 | 210,20 | 0,022 |

Fonte: o autor.

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas das misturas obtidas pelo Q-Mix, indicando o nível de empacotamento de cada composição. A partir da curva de maior compacidade, definida como base para o traço piloto, verificou-se que a mistura TPF (substituição da areia fina natural por areia artificial) foi a que mais se aproximou do modelo teórico. Esse resultado evidencia que a areia natural apresenta deficiência na fração fina, a qual é corrigida pelo uso do resíduo de britagem, melhorando o empacotamento da mistura.

**Figura 3: Curvas granulométricas da mistura dos agregados.**

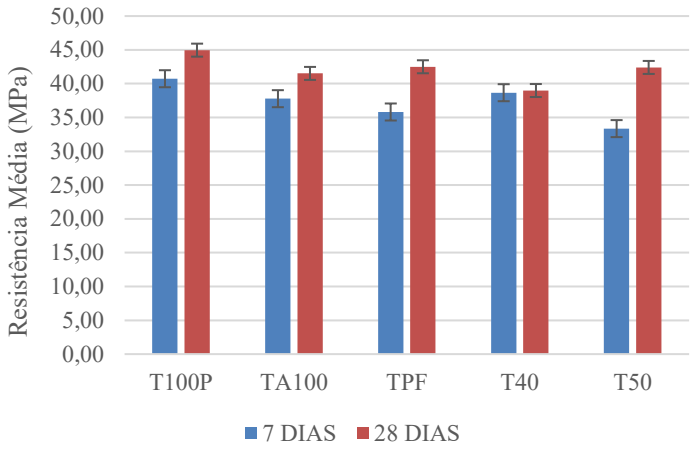



Fonte: o autor.

## ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A Figura 4 mostra os resultados de resistência à compressão. Observou-se que a substituição total da areia natural por pó de pedra (T100P) apresentou o melhor desempenho, com 44,96 MPa aos 28 dias, representando aumento de 8,3% em relação ao traço de referência. Esse resultado indica melhor densificação da matriz devido às características do pó de pedra. Em contrapartida, o traço com 40% de substituição (T40) apresentou redução de resistência e baixo ganho ao longo do tempo, sugerindo desempenho inferior da mistura.

**Figura 4: Ensaio de resistência à compressão.**




Fonte: o autor.

Entre os traços com substituição parcial, o T50 e o TPF apresentaram bom desempenho aos 28 dias, atingindo resistências próximas ou equivalentes ao traço de referência, com evolução significativa ao longo do tempo. A análise estatística indicou que não houve diferença significativa entre os traços e a referência, todos atendendo ao requisito mínimo de resistência, confirmando a viabilidade estrutural da substituição.

Os resultados estão em consonância com estudos anteriores, embora haja variações quanto ao teor ótimo de substituição, o que depende das características dos materiais e do método de dosagem. Conclui-se que a substituição da areia natural por areia artificial é viável, especialmente nos níveis de 50% e 100%, enquanto o traço de 40% apresenta desempenho inferior e necessita de ajustes de formulação.

## MIGRAÇÃO DE CLORETOS

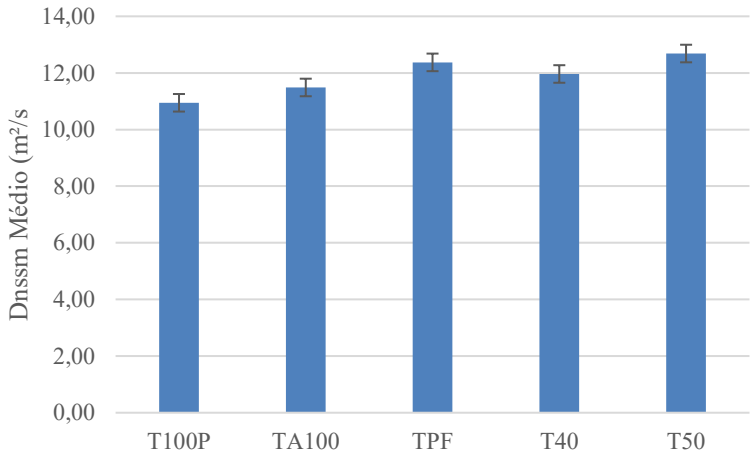
A Figura 5 mostra um corpo de prova rompido e pulverizado com AgNO3. A análise dos ensaios de migração de cloretos em concretos com substituição de areia natural por artificial revelou um comportamento contraintuitivo, visto na Figura 6 e em comparação com os coeficientes na Tabela 2, observa-se que o traço T100P, com 100% de substituição, apresentou o menor coeficiente de migração na ordem de 10,95 × $10^{-12}$ m²/s, indicando a maior resistência à penetração de cloretos. Em contraste, substituições parciais como em T40 e T50, resultaram em desempenho inferior, com coeficientes de 11,96 × $10^{-12}$ m²/s e 12,69 × $10^{-12}$ m²/s, respectivamente. Este padrão sugere que a substituição total permite uma reorganização da curva granulométrica, otimizando o empacotamento e produzindo uma matriz mais densa e menos permeável. Já as substituições parciais parecem gerar descontinuidades no esqueleto granular, aumentando a porosidade e facilitando a penetração iônica.

**Figura 5: Corpo de prova rompido e com AgNO3 pulverizado.**



Fonte: o autor.

**Figura 6: coeficientes de migração de cloretos em estado não estacionário.**




Fonte: o autor.

**Tabela 2: Classificação de acordo com a resistência à penetração de cloretos**

| COEFICIENTE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS ($D_{28}x10^{-12}m^2/s$) | RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO DOS CLORETOS |
|---|---|
| > 15 | Baixa |
| 10 - 15 | Moderada |
| 5 - 10 | Alta |
| 2,5 - 5 | Muito Alta |
| < 2,5 | Extremamente Alta |

Fonte: o autor.

O estudo de [2], que avaliou a substituição de cimento por filler calcário, identificou um ponto ótimo em torno de 34% de substituição, enquanto teores mais elevados prejudicaram a durabilidade. Essa diferença em relação à substituição de areia artificial decorre do fato de que, neste caso, o efeito é predominantemente físico, ligado ao empacotamento granular, ao passo que o filler atua quimicamente na matriz cimentícia.

Os resultados também indicam que concretos com substituição de areia podem apresentar menor coeficiente de migração de cloretos do que misturas com alto teor de filler, sugerindo melhor desempenho quando a substituição de agregado é

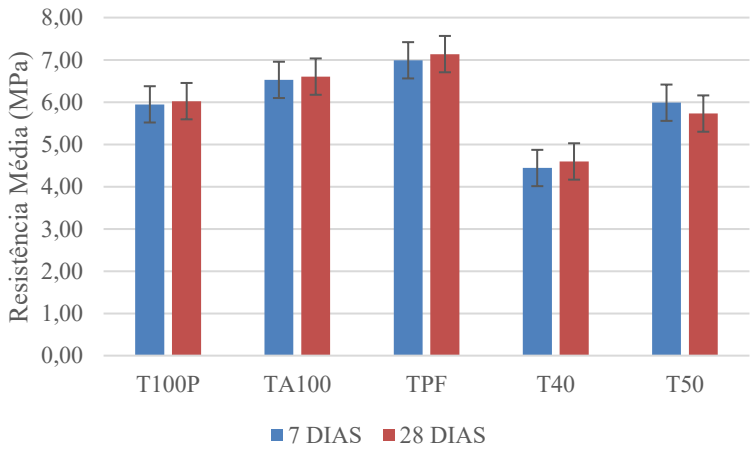
adequadamente dosada. Em ambos os casos, reforça-se que a otimização da dosagem e do empacotamento da microestrutura é essencial para garantir a durabilidade.

Conclui-se que estratégias sustentáveis de substituição exigem abordagens distintas, sendo que a substituição total de areia pode ser vantajosa para resistência a cloretos, enquanto substituições de cimento demandam maior equilíbrio entre proporção e desempenho, com validação experimental rigorosa antes da aplicação em campo.

## TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral, apresentados na Figura 7, revelam uma notável variação no desempenho dos diferentes traços estudados. O traço com 40% de substituição (T40) apresentou a redução mais acentuada, atingindo apenas 4,60 MPa aos 28 dias, o que representa uma queda de 30,3% em relação ao concreto de referência TA100 com 6,60 MPa. Esse comportamento sugere uma possível falha na compactação ou uma microestrutura comprometida devido ao desbalanço na composição granulométrica. Em contrapartida, o traço com substituição apenas da areia fina natural pela artificial (TPF) obteve o melhor desempenho, com 7,14 MPa, superando a referência em 8,2%, o que indica que a substituição seletiva da fração mais fina pode otimizar significativamente a aderência na interface da matriz.

**Figura 7: Resistência à compressão diametral**




Fonte: o autor.

A substituição total (T100P) resultou em resistência à tração de 6,02 MPa, com redução de 8,8% em relação ao concreto de referência, enquanto o traço com 50% de substituição (T50) apresentou 5,73 MPa, correspondendo a uma queda de 13,2%. Apesar dessas variações, o teste estatístico (t, $\alpha = 5\%$) indicou ausência de diferença significativa entre os traços e o concreto de referência, confirmando a viabilidade da substituição em termos de desempenho mecânico à tração. O T50, embora inferior, ainda se manteve dentro de um patamar estrutural aceitável.

Em comparação com estudos como o de [9], que observaram aumento de até 47,6% na resistência à tração com 50% de substituição, verifica-se uma divergência nos

resultados, evidenciando que o comportamento do concreto é fortemente influenciado pelas características do material e pela morfologia das partículas.

Conclui-se que a substituição da areia natural por areia artificial é viável quanto à resistência à tração, mesmo com reduções de até 13,2%, uma vez que os resultados foram estatisticamente equivalentes ao traço de referência. Entretanto, o desempenho depende da estratégia de substituição e do controle granulométrico e morfológico, sendo a substituição seletiva da fração fina a alternativa mais promissora.

## POTENCIAL DE CORROSÃO

Com base nos potenciais de corrosão apresentados na Tabela 3 e na Figura 8, observou-se uma diferença na passividade do aço com a substituição da areia natural por pó de pedra. Os traços T40 e T50 apresentaram os melhores desempenhos, com potenciais de corrosão (Ecorr) variando entre -113 e -135 mV aos 28 dias, indicando elevada passividade da armadura. O traço T50 destacou-se com Ecorr de aproximadamente -114 mV, representando uma melhoria de cerca de 21% em relação ao concreto de referência (TA100), sugerindo maior eficiência na proteção do aço.

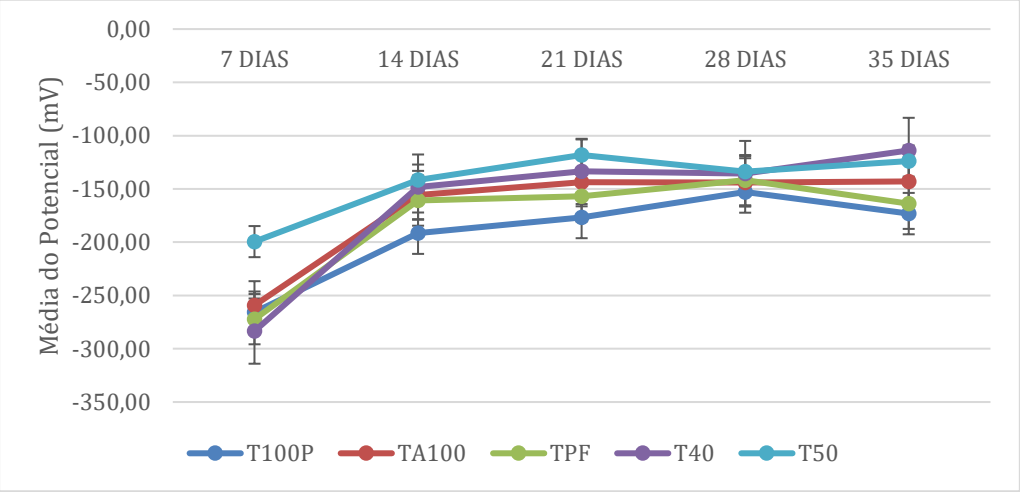
Esse comportamento pode estar associado tanto ao efeito físico de densificação da matriz quanto à melhoria da capacidade de passivação do aço, conforme discutido por [10]. O pó de pedra atua como material fino do tipo “filler”, preenchendo vazios entre os agregados maiores e reduzindo a permeabilidade do concreto. Isso resulta em uma barreira física mais eficiente contra a entrada de agentes agressivos, como $CO_2$ e umidade, retardando o início do processo de corrosão.

**Tabela 3: Classificação dos potenciais de corrosão de acordo com [8].**

| POTENCIAL – Ecorr (mV) | PROBABILIDADE DE CORROSÃO |
|---|---|
| E > -200 | < 10% |
| -200 ≥ E≥ -350 | Incerteza sobre a corrosão |
| E < -350 | > 90% |

Fonte: o autor.

**Figura 8: Média dos potenciais.**




Fonte: o autor.

O estudo de [11] avaliou concretos com diferentes relações água/cimento, observando que mesmo concretos de menor resistência mantiveram baixos níveis de taxa de corrosão (Icorr < 0,1 µA/cm²) ao longo de 120 dias, indicando estado de passividade, o que foi atribuído ao efeito de selamento da matriz devido à precipitação de produtos que reduziram a porosidade e a permeabilidade. Embora os potenciais de corrosão (Ecorr) tenham se tornado mais negativos, sugerindo maior tendência termodinâmica à corrosão, a cinética permaneceu desprezível.

De forma semelhante, no presente estudo, os concretos com 40% e 50% de substituição de areia natural por pó de pedra, mesmo apresentando menores resistências à compressão, exibiram melhores indicadores de passividade aos 28 dias. Esse comportamento pode ser explicado por um mecanismo análogo de densificação da microestrutura, no qual o efeito filler do pó de pedra reduz a permeabilidade e dificulta a entrada de agentes agressivos, como oxigênio e íons cloreto, retardando o processo de despassivação do aço e mantendo baixa atividade corrosiva.

## CONCLUSÃO

O estudo indica a viabilidade técnica da substituição da areia natural por areia artificial de britagem em concreto, destacando que a substituição total (T100P) apresentou o melhor desempenho, com aumento de 8,3% na resistência à compressão e maior resistência à penetração de cloretos, devido ao melhor empacotamento granular. Em contrapartida, substituições parciais, especialmente a de 40% (T40), prejudicaram as propriedades mecânicas e de durabilidade, indicando que a descontinuidade granulométrica pode afetar negativamente a microestrutura do concreto.

Do ponto de vista econômico e ambiental, a solução é vantajosa, pois o pó de pedra e a areia artificial são subprodutos de baixo custo, permitindo a valorização de resíduos da britagem e reduzindo a extração de areia natural. Para aplicação prática, as melhores condições foram observadas nas substituições totais ou próximas de 50%, embora a proporção ideal dependa das características locais dos materiais, exigindo validação experimental e controle de qualidade. Assim, a areia artificial se apresenta como uma alternativa sustentável, técnica e economicamente competitiva para o concreto estrutural.

## Declaração

Os autores declararam que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

## REFERÊNCIAS

[1] ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 29–46, abr./jun. 2004.

[2] SANTOS, R. A.; MEIRA, G. R.; ANDRADE FILHO, W. M.; OLIVEIRA, M. C. B. M.; MORAIS, V. K. S.; RODRIGUES, S. F. F.; MATIAS NETO, J. **Durability and mechanical properties of concretes with limestone filler with particle packing**. Materiales de Construcción, v. 74, n. 355, e348, 2024. DOI: https://doi.org/10.3989/mc.2024.366423

[3] ALMEIDA, T. M. S.; JESUS, W. S.; SOUZA, M. T.; AZEVEDO, F. A.; SILVA, F. S. M.; SOUZA, R. M.; PESSÔA, J. R. C. **Assessing the mechanical properties and workability of concretes with stone powder as a sustainable alternative material to natural sand**. REM: International Engineering Journal, Ouro Preto, v. 78, n. spe1, e230171, jan./mar. 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/0370-44672023780171

[4] YANG, X.; PAN, M.; ZHENG, S.; LIANG, J.; TAN, M.; RONG, H. **Influence of stone dust content on carbonation performance of manufactured sand concrete (MSC)**. Journal of Building Engineering, v. 76, p. 107341, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107341

[5] NORDTEST. **NT Build 492**: Concrete, mortar and cement-based repair materials – chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo, Finlândia, 1999.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

[8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876-09**: standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken: ASTM, 2022.

[9] KUJUR, F. E.; SRIVASTAVA, V.; AGARWAL, V. C.; DENIS, A. F.; ALI, E. **Stone dust as partial replacement of fine aggregate in concrete**. Journal of Academia and Industrial Research (JAIR), v. 3, n. 3, p. 148–151, ago. 2014.

[10] LV, D.; LIU, H.; MIAO, Q.; WANG, W.; TAN, G.; SHI, C.; LI, H. **Quantitative characterization of passivation process of steel reinforcement in concrete towards durability against anticorrosion based on electrochemical methods.** Applied Sciences, v. 14, n. 3, p. 1297, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14031297

[11] BALTAZAR-ZAMORA, M. A.; SANTIAGO, H, G.; GAONA, C. T.; MALDONADO-BANDALA, E. E.; BARRIOS-DURSTEWIST, C. P.; NÚÑEZ-J, R. E.; PÉREZ-LÓPEZ, T.; ZAMBRANO R, P.; ALMERAYA-CALDERÓN, F. **Evaluation of the corrosion at early age in reinforced concrete exposed to sulfates**. International Journal of Electrochemical Science, v. 7, p. 588-600, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13361-X