

USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

Elias T. Brito¹, PhD. Yuri D. J. Costa², PhD. Carina Costa^{1,2}

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil (eliasbritoengenhariacivil@gmail.com)

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil

Resumo: Este trabalho analisa o uso de agregados reciclados de construção e demolição associados a plásticos triturados, vidro moído e lama vermelha em fundações. Avaliam-se os impactos mecânicos, durabilidade e critérios normativos nacionais (NBR 6118, NBR 6122, NBR 8522-1). Resultados indicam que a substituição de até 30% do agregado viabiliza concretos classe superior a C30, otimizando a interface solo-estrutura. Valida-se a viabilidade nas formações arenosas de Natal/RN.

Palavras-chave: Agregados Reciclados; Resíduos Emergentes; Elementos de Fundação; Engenharia Geotécnica.

INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica e de fundações contemporânea enfrenta o complexo e inadiável desafio de conciliar o avanço contínuo da infraestrutura urbana com as prementes demandas globais por sustentabilidade ambiental, conservação de recursos naturais e transição para uma economia verdadeiramente circular. As obras de fundação, por sua natureza de elemento subterrâneo de transição e suporte das cargas de superestruturas, demandam volumes massivos de matérias-primas convencionais. Destacam-se entre essas matérias-primas o cimento Portland, os agregados naturais pétreos (areias e britas) e o aço estrutural. A extração desenfreada e o processamento intensivo desses materiais provocam severos passivos ecológicos, que incluem desde a destruição de ecossistemas em áreas de jazidas e pedreiras até a emissão maciça de dióxido de carbono (CO_2) decorrente da calcinação e clinkerização do calcário na indústria cimenteira.

Nesse cenário de degradação ambiental e escassez de recursos pétreos em grandes centros urbanos, a substituição parcial ou integral de insumos convencionais por subprodutos industriais e resíduos sólidos processados surge como uma alternativa tecnicamente viável, economicamente atrativa e ecologicamente indispensável. Materiais de uso já amplamente consolidado na pavimentação — como o Resíduo de Construção e Demolição (RCD), escórias granuladas de alto-forno e raspas de pneus inservíveis — passam agora a ser integrados por resíduos emergentes de elevado passivo ambiental. Entre estes, destacam-se os polímeros triturados oriundos do descarte urbano (notadamente o Polietileno de Alta

Densidade - PEAD e o Politereftalato de Etileno - PET), o vidro sodo-cálcico moído proveniente de embalagens descartáveis e a lama vermelha, subproduto altamente alcalino gerado no processo Bayer de beneficiamento da bauxita.

A incorporação desses resíduos em elementos de fundação profunda (como estacas escavadas, estacas pré-moldadas e tubulões), fundações superficiais (sapatas, vigas de fundação e radiers) e técnicas de melhoria geotécnica de solos (colunas de solo-cimento e *Deep Soil Mixing*) representa uma oportunidade para a engenharia de infraestrutura. No entanto, a introdução de matrizes alternativas no meio subterrâneo exige um entendimento aprofundado e rigoroso de sua resposta mecânica (resistência à compressão simples, tração por compressão diametral, tenacidade e módulo de elasticidade), das suas propriedades reológicas no estado fresco e do seu comportamento frente aos agentes agressivos do solo a longo prazo.

A interação entre os agregados reciclados, polímeros, ligantes alternativos e o meio poroso do solo subterrâneo altera significativamente os mecanismos clássicos de transferência de carga e a durabilidade das estruturas sob ação de águas subterrâneas agressivas. Este trabalho aborda o estado da arte e as fronteiras tecnológicas da aplicação de materiais reciclados e resíduos emergentes em elementos de fundação. São delimitados os avanços científicos alcançados, os critérios de dosagem ideal, os impactos físico-mecânicos, os parâmetros de durabilidade a longo prazo e as restrições normativas impostas pelas diretrizes brasileiras de projeto e execução.

MATERIAL E MÉTODOS

O protocolo experimental para caracterização, aceitação e aplicação ambiental de materiais reciclados e subprodutos industriais em contato direto com o subsolo baseia-se rigidamente no conjunto normativo estabelecido pelas diretrizes ABNT NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006 e NBR 10007. O objetivo central dessa avaliação é quantificar e mitigar o risco de contaminação das águas subterrâneas por meio de ensaios padronizados de lixiviação e solubilização de contaminantes.

A metodologia de caracterização química exige que os resíduos secos e homogêneos sejam submetidos a extração aquosa sob agitação contínua, simulação de intemperismo e exposição a fluidos lixivantes de pH controlado. Os extratos lixiviados e solubilizados obtidos são devidamente filtrados em membranas de $0,45 \mu\text{m}$ e direcionados à análise instrumental avançada via Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Esse procedimento permite determinar as concentrações residuais de metais pesados (como cromo, cádmio, chumbo e arsênio) e íons livres, assegurando que o emprego de materiais quimicamente complexos, como a lama vermelha de bauxita, permaneça dentro dos limites de toxicidade estabelecidos pelas resoluções ambientais vigentes, prevenindo qualquer impacto adverso aos aquíferos locais.

No que tange à caracterização mecânica e deformacional das matrizes cimentícias alteradas, a determinação do módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) foi realizada em estrita conformidade com as diretrizes da norma ABNT NBR 8522-1. Para tanto, moldaram-se corpos de prova cilíndricos padronizados nas dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, submetidos ao processo de cura úmida padronizada em câmara saturada (umidade relativa $\geq 95\%$) até as idades de ensaio de 28 e 90 dias.

O procedimento de ensaio mecânico para a determinação do módulo estático foi executado em uma prensa eletromecânica servo-controlada com capacidade nominal de 2000 kN, mantendo-se uma taxa de aplicação de carga constante padronizada em $0,60 \pm 0,20 \text{ MPa/s}$. A instrumentação dos corpos de prova contou com a fixação de strain-gauges elétricos ou extensômetros de clipe (*clip-gages*) posicionados simetricamente na seção central das amostras para leitura das deformações longitudinais sob ciclos de carga e descarga pré-definidos. O Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs}) é derivado matematicamente pela equação (1), que correlaciona a variação de tensão entre os níveis superior (σ_a , correspondente a 30% da resistência à compressão estimada) e inferior (σ_b , fixado em 0,5 MPa) com suas respectivas deformações específicas (ε_a e ε_b):

$$E_{cs} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sustentabilidade e Classificação de Materiais Reciclados

A evolução da geotecnia ambiental impôs um novo paradigma de análise baseado no conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e na busca por soluções com reduzida pegada de carbono para obras de fundação e infraestrutura subterrânea. A substituição do cimento Portland por ligantes geopoliméricos e matrizes ativadas alcalinamente a partir de resíduos ricos em aluminossilicatos representa um avanço expressivo. Nesse contexto, os agregados de RCD fornecem esqueleto mineral com elevada angularidade; os resíduos poliméricos e elastoméricos promovem incremento de tenacidade e capacidade de amortecimento dinâmico; e os resíduos finos (vidro moído e lama vermelha) atuam como adições pozolânicas ou ativadores alcalinos de baixo custo. A Tabela 1 detalha a aplicabilidade e as restrições operacionais destes materiais.

Tabela 1. Aplicabilidade e impacto geotécnico de resíduos em fundações.

MATERIAL RESÍDUO	FUNÇÃO NO ELEMENTO	PRINCIPAL PROPRIEDADE ALTERADA	PRINCIPAL RESTRIÇÃO TÉCNICA
PLÁSTICOS RECICLADOS (PET/PEAD)	Substituição de agregados finos ou adição de microfibras	Aumento da tenacidade à flexão; redução do peso específico do fuste.	Queda na aderência inicial matriz-azo; redução do módulo de elasticidade.
VIDRO MOÍDO DE DESCARTE	Filler pozolânico (substituição parcial do cimento)	Redução drástica da permeabilidade; bloqueio contra ataques químicos.	Risco de Reação Alcali-Agregado (RAA) se a moagem não for ultrafina.
LAMA VERMELHA (BAUXITA)	Precursor/Ativador alcalino em Geopolímeros	Estabilização química de solos moles e ativação alcalina de baixo custo.	Elevado pH residual; exige controle rigoroso de lixiviação ambiental.

A triagem técnica e normativa dos resíduos é uma etapa crucial para garantir que a aplicação atenda aos parâmetros legais estipulados pela Resolução CONAMA 307 e pela ABNT NBR 10004, cujo fluxo decisório está esquematizado na Figura 1.

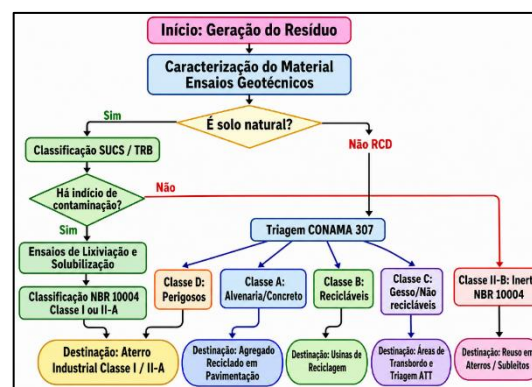


Figura 1. Fluxograma de classificação e destinação de resíduos aplicados à engenharia.

As características microestruturais das matrizes contendo resíduos revelam que a porosidade intrínseca da argamassa antiga aderida aos grãos do Agregado Reciclado de Concreto (ARC) tende a elevar a absorção de água e a reduzir a resistência à compressão do concreto (Silva e Santos, 2022). Por sua vez, a introdução de partículas de polímeros (PET/PEAD) triturados modifica a zona de transição interfacial (ZTI), gerando um amortecimento microestrutural que reduz a propagação de microfissuras internas sob tensões de tração na flexão (Smith et al., 2021). No caso do vidro sodo-cálcico moído abaixo de $45\ \mu\text{m}$, a sua sílica amorfa reage quimicamente com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gerado na hidratação do cimento, convertendo-o em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário. Este processo refina a estrutura de poros, bloqueia os canais capilares e inibe a penetração de íons sulfato (SO_4^{2-}), prevenindo a expansão etringítica tardia no meio subterrâneo (Garcia e Martinez, 2025).

O uso da lama vermelha de bauxita como ativador ou precursor em sistemas geopoliméricos alavanca o aproveitamento de um resíduo industrial historicamente problemático. Sua forte alcalinidade atua dissolvendo as fases de aluminossilicatos presentes nas cinzas volantes ou metacaulim, promovendo a polimerização rápida e a formação de géis tipo N-A-S-H ou C-A-S-H de alta resistência inicial e estabilidade química superior no subsolo (Zhang et al., 2023).

Aplicação Prática e Especificidades Regionais

A viabilidade técnica do uso de resíduos reciclados ganha especial relevância quando contextualizada nas especificidades geotécnicas regionais. Nas regiões litorâneas e formações sedimentares do Nordeste brasileiro — como as dunas de Natal/RN e as camadas da Formação Barreiras —, os solos predominantemente encontrados são areias quartzosas finas a médias, mal graduadas e com coesão nula ($c' = 0$). A incorporação controlada de finos de RCD a esses solos atua promovendo o preenchimento dos vazios intergranulares (efeito *filler*) e aumentando o número de pontos de contato entre os grãos.

O rearranjo granulométrico proporcionado pela adição de finos minerais reciclados eleva o ângulo de atrito interno (ϕ') do maciço arenoso e gera uma coesão aparente duradoura. Esse fenômeno melhora a capacidade de suporte do solo de fundação, mitiga recalques imediatos e por adensamento sob sapatas e radiers, além de permitir o uso eficiente do solo local tratado na criação de colchões de distribuição de carga, como ilustrado no perfil da Figura 2.

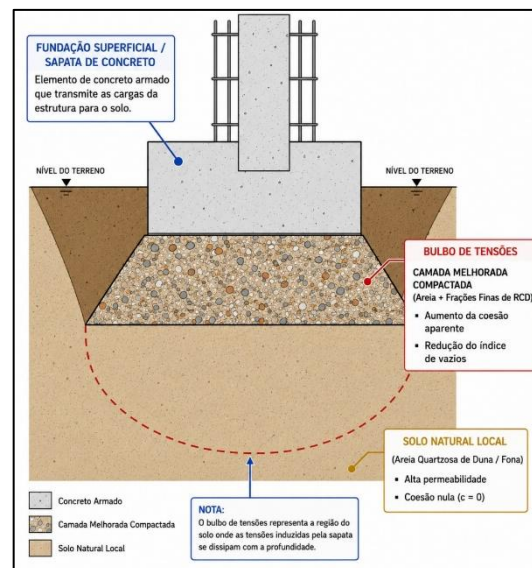


Figura 2. Perfil esquemático de melhoria de solo utilizando mistura com frações finas de RCD.

A aplicação dessas misturas recicladas demonstra grande potencial de otimização quando avaliada nas formações arenosas regionais. As camadas superficiais do subsolo litorâneo, caracterizadas pela baixa capacidade de suporte original, passam a oferecer uma resposta elasto-plástica superior sob tensões transmitidas pelo bulbo de pressões de fundações diretas. O travamento mecânico entre os grãos angulares do RCD e o esqueleto quartzoso natural cria uma matriz densa, estabilizando as tensões cisalhantes e reduzindo a suscetibilidade à erosão interna ou piping.

Tratando-se de fundações profundas moldadas *in loco* em solos altamente permeáveis, a adição de macrofibras de PET atua como um elemento de reforço tridimensional secundário (Smith et al., 2021). Essas fibras controlam a fissuração por retração plástica durante o período de cura subterrânea e aumentam a tenacidade residual da estaca frente a momentos fletores indesejados originados por desprumos executivos ou empuxos laterais do solo.

Proporções, Propriedades Mecânicas e Durabilidade

Para viabilizar a aplicação de concretos reciclados em estacas escavadas estruturais ($f_{ck} \geq 30\ \text{MPa}$), a dosagem estabelece parâmetros estritos: consumo mínimo de aglomerante cimentício de $380\ \text{kg/m}^3$, substituição máxima de 30% do agregado miúdo natural por ARC, 0,5% em volume de macrofibras poliméricas de PET e teor de aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico fixado em 1,0% em relação à massa de cimento para assegurar a trabalhabilidade exigida (*slump* de $220 \pm 20\ \text{mm}$). Em colunas de solo-cimento e estacas geopoliméricas,

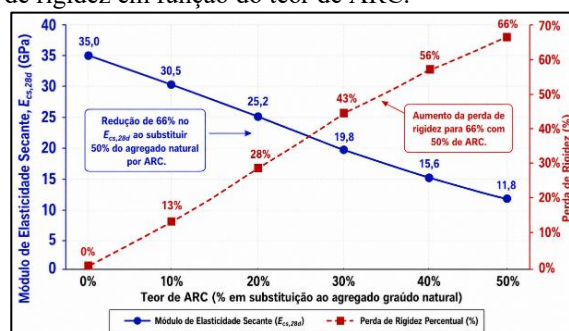
emprega-se uma matriz de 50% de cinza volante, 30% de lama vermelha e 20% de vidro moído, ativada por uma solução de silicato de sódio (Na_2SiO_3) com razão mássica água/sólidos de 0,38. Os dados mecânicos resultantes estão consolidados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e deformacionais do concreto de fundação com diferentes teores de ARC e fibras poliméricas.

GRUPO DE ENSAIO	$f_{cm,7d}$	$f_{cm,28d}$	$f_{cm,90d}$	$f_{ct,sp,28d}$	$E_{cs,28d}$	PERDA DE RIGIDEZ (E_{cs})
	MPa	MPa	MPa	MPa	(GPa)	
0% ARC (REF)	22,4	34,2	38,5	2,95	31,5	0,00%
20% ARC + 0,5% PET	20,9	32,8	37,4	3,12	28,4	-9,84%
50% ARC + 0,5% PET	18,6	29,5	35,1	3,25	24,1	-23,49%
100% ARC + 0,5% PET	15,2	24,1	30,8	2,85	19,3	-38,73%

A análise da Tabela 2 revela um ganho significativo na resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), que atinge seu valor máximo de 3,25 MPa no traço contendo 50% de ARC e 0,5% de PET. Esse fenômeno resulta do efeito de costura (*bridging effect*) exercido pelas fibras poliméricas ao longo das microfissuras da matriz. Em contrapartida, observa-se uma queda acentuada no Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs}), cujas taxas de perda chegam a -38,73% para substituição total do agregado, conforme detalhado no Gráfico 1.

Gráfico 1. Módulo de Elasticidade Secante e perda de rigidez em função do teor de ARC.



A degradação do módulo de elasticidade deve-se à menor rigidez intrínseca da argamassa porosa aderida ao agregado reciclado. Os ensaios de durabilidade em meio aquoso agressivo e exposto a atmosferas ácidas subterrâneas aos 90 dias de cura foram sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de desempenho estrutural, propriedades físicas e indicadores de durabilidade aos 90 dias.

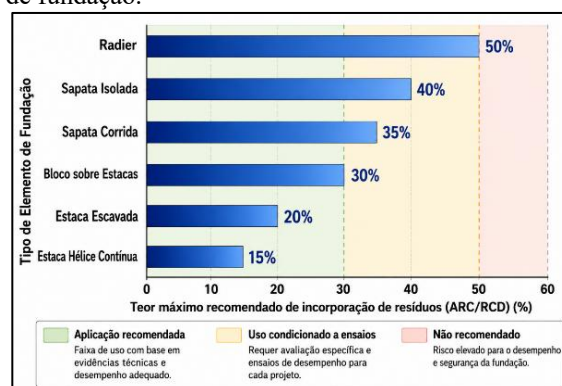
GRUPO DE ENSAIO	ÍNDICE DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m³)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (ϵ_{c2} (‰))	PROF. CARBONATAÇÃO AOS 90D (mm)	PERDA DE MASSA POR SULFATOS (%)	DESVIO-PADRÃO (σ_m (MPa))
0% ARC (REF)	9,8	2.380	2,00	4,2	0,15%	1,8
20% ARC + VIDRO MOÍDO	10,1	2.340	2,05	4,5	0,18%	2,2
50% ARC + VIDRO MOÍDO	12,4	2.260	2,18	6,1	0,38%	3,1
100% ARC + VIDRO MOÍDO	16,2	2.150	2,35	8,9	0,72%	4,5

Embora a porosidade total e a profundidade de carbonatação se elevem com o teor de ARC, a adição do vidro moído como filler pozolânico reduz a permeabilidade à água e limita a perda de massa por sulfatos a no máximo 0,72% mesmo no traço com 100% de substituição. Notadamente, a deformação específica de ruptura (ϵ_{c2}) aumenta gradualmente de 2,00‰ para 2,35‰, indicando um comportamento mecânico mais dútil e menos frágil sob carregamentos elevados.

Recomendações Técnicas, Cenário Internacional e Custos

A taxa de substituição segura de agregados convencionais por resíduos não é uniforme e varia em função da metodologia executiva da fundação, das exigências de fluidez e da criticidade do elemento estrutural. O Gráfico 2 apresenta as percentagens máximas recomendadas baseadas na experiência técnica e na literatura especializada.

Gráfico 2. Capacidade máxima recomendada de incorporação segura de resíduos por tipo de elemento de fundação.

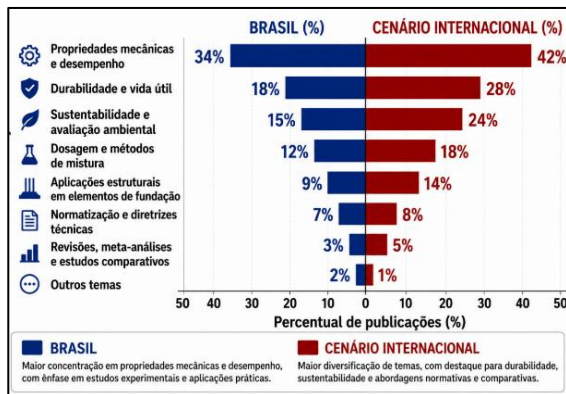


Fundações superficiais sob estado plano de tensões (radiers e sapatas) aceitam até 50% de substituição por ARC sem comprometer a estabilidade vertical, uma vez que operam predominantemente sob compressão simples (Souza et al., 2024). Em contraste, elementos profundos executados mecanicamente por bombeamento contínuo sob alta pressão — como as estacas hélice contínua — exigem restrição a no máximo 15% de resíduo para evitar o entupimento da

tubulação e o risco de descontinuidade do fuste (Silva e Santos, 2022).

A adoção dessas tecnologias no Brasil apresenta uma assimetria quando comparada ao cenário internacional, conforme representado no Gráfico 3.

Gráfico 3. Publicações científicas e normativas: Brasil X cenário internacional.



Enquanto mercados internacionais (União Europeia, Estados Unidos e China) já contam com diretrizes normativas consolidadas que regulamentam o uso de agregados reciclados de alta qualidade em estruturas subterrâneas, a pesquisa nacional ainda esbarra na heterogeneidade do RCD local e na ausência de normas ABNT específicas para concreto estrutural reciclado.

Sob a ótica econômico-financeira, o emprego de ARC e vidro descartado proporciona uma redução entre 40% e 60% no custo direto dos agregados minerais na usina. Essa economia absorve o acréscimo de custo decorrente do aumento na dosagem de aditivos superplastificantes (30% a 50% superiores aos traços de referência). O balanço financeiro consolidado do metro cúbico (m^3) do concreto reciclado para fundações resulta em uma economia real líquida entre 8% e 12% em relação às misturas convencionais, garantindo atratividade econômica para o setor produtivo.

CrITÉRIOS Normativos de Dimensionamento GeotécnicO e Estrutural

O projeto e o dimensionamento geotécnico da capacidade de carga última (Q_u) de fundações profundas incorporando concreto reciclado fundamentam-se nas diretrizes da norma ABNT NBR 6122, sendo determinada pela soma da capacidade de ponta (Q_p) e da resistência de atrito lateral (Q_s), expressa pela equação (2):

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p \cdot A_p + \sum (q_s \cdot A_s) \quad (2)$$

A maior angularidade e a rugosidade superficial das partículas de ARC conferem um ganho observável no

atrito lateral (Q_s) ao longo do fuste quando cravadas ou escavadas em solos granulares arenosos. O comportamento de transferência de cargas, a distribuição de molas do solo e os perfis de encurtamento elástico sob carregamento estático axial estão representados nas Figuras 3, 4 e 5.

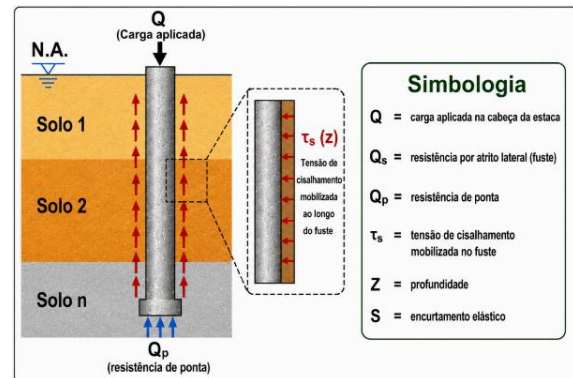


Figura 3. Modelo de transferência de carga em estaca com concreto reciclado.

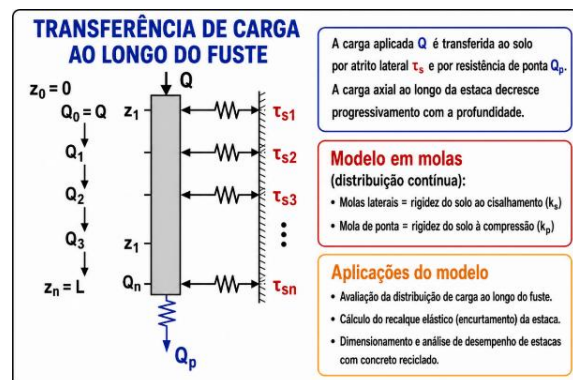


Figura 4. Transferência de carga ao longo do fuste de estaca com concreto reciclado.

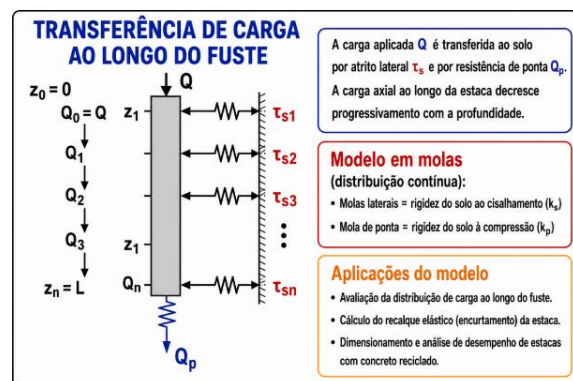


Figura 5. Modelo de encurtamento elástico da estaca com concreto reciclado.

No dimensionamento em Estado Limite de Serviço (ELS), o encurtamento elástico da estaca (ΔL) assume papel crítico em função da redução do módulo de elasticidade do concreto reciclado (E_c), sendo



calculado através da expressão clássica da elasticidade:

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E_c} \quad (3)$$

Estruturalmente, conforme determina a NBR 6118, proíbe-se estimar analiticamente o módulo de rigidez para agregados não convencionais, devendo o valor de E_{cs} vir obrigatoriamente de ensaios específicos da NBR 8522-1. Devido à maior dispersão estatística e desvio-padrão de 4,5 MPa verificado na Tabela 3, o coeficiente de ponderação estrutural do concreto deve ser preventivamente majorado de $\gamma_c = 1,4$ para $\gamma_c = 1,6$ no cálculo de armações limites.

Do ponto de vista do dimensionamento estrutural e da conformidade com as normas vigentes, as alterações nas propriedades mecânicas do concreto reciclado exigem uma revisão nos coeficientes de segurança empregados. Devido ao comportamento elástico diferenciado do material, a norma NBR 6118 proíbe terminantemente a estimativa analítica teórica da rigidez para concretos que utilizem agregados não convencionais, obrigando o projetista a obter o valor real do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) unicamente por meio dos ensaios padronizados da NBR 8522-1. Além disso, o aumento verificado na dispersão estatística dos resultados mecânicos — evidenciado pelo desvio-padrão (σ_m) que se eleva de 1,8 MPa no referencial para até 4,5 MPa nos traços de substituição total — demanda uma postura preventiva no cálculo de armações. Torna-se imperativo majorar o coeficiente de ponderação do concreto de seu valor padrão de $\gamma_c = 1,4$ para $\gamma_c = 1,6$ no cálculo de esforços limites. Essa majoração é fundamental para absorver a heterogeneidade do RCD e garantir que o cálculo do encurtamento elástico (ΔL) atenda com segurança aos Estados Limites de Serviço (ELS) definidos pela NBR 6122.

CONCLUSÃO

A investigação técnica e experimental válida a aplicabilidade de materiais reciclados (RCD, plásticos triturados, vidro moído e lama vermelha de bauxita) no desenvolvimento de elementos de fundação geotécnica e estruturalmente eficientes. As principais conclusões objetivas do estudo são:

- A redução no módulo de elasticidade do concreto reciclado é compensada pelo aumento da tenacidade e pelo excelente desempenho no atrito lateral fuste-solo, adaptando-se com eficácia às condições dos solos arenosos de Natal/RN e da Formação Barreiras.
- A adição pozolânica de vidro moído assegura elevada durabilidade contra sulfatos e carbonatação, enquanto a utilização dos resíduos viabiliza uma economia líquida de

até 12% por metro cúbico de concreto, unindo viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e segurança estrutural em conformidade com o arcabouço normativo nacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao PPCIVAM pelo suporte institucional para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.
- GARCIA, M.; MARTINEZ, L. Ground glass powder as a pozzolanic binder in deep soil mixing applications for residential foundations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 151, n. 3, p. 412-425, 2025.
- SILVA, R. C.; SANTOS, M. F. Desempenho mecânico e aderência solo-estrutura de estacas



escavadas moldadas com concreto de agregados reciclados. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 140-153, 2022.

SMITH, J.; BROWN, T.; DAVIS, L. Driveability and structural performance of precast concrete piles reinforced with recycled HDPE fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 294, p. 112-126, 2021.

SOUZA, A. L.; OLIVEIRA, P. R.; LIMA, G. M. Utilização de elastômeros reciclados de pneus na melhoria de solos de suporte para fundações superficiais submetidas a cargas dinâmicas. **Geletras e Geotecnia**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 1, p. 81-95, 2024.

ZHANG, Y. et al. Durability and axial compressive capacity of eco-friendly alkali-activated slag/fly ash geopolymer concrete piles under sulfate environments. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 138, p. 1099-1115, 2023.