

COMPORTAMENTO CÍCLICO DE ATERROS DE ENCONTROS DE PONTES INTEGRAIS: INFLUÊNCIA DA SUÇÃO MATRICIAL EM COMPÓSITOS DE SOLO E DESBASTES DE PNEUS

Hilton Targino Bezerra¹, Yuri Daniel Jatobá Costa², Carina Maia Lins Costa²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal, Brasil (hiltontargino@outlook.com)

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil

Resumo: Este estudo avalia a influência da sucção matricial no comportamento cíclico de aterros de pontes integrais com compósitos de areia e desbastes de pneus. Foram analisados ensaios de compactação, ensaios físicos em modelo físico, curva de retenção de água e tomografia computadorizada. Os resultados indicam redução das pressões laterais com a incorporação de desbastes e sugerem que sucção e deformabilidade podem contribuir para a formação de gap e o levantamento superficial.

Palavras-chave: Ponte integral; Aterro de encontro; Solo não saturado; Desbastes de pneu; Tomografia computadorizada.

INTRODUÇÃO

Pontes integrais são sistemas nos quais o tabuleiro permanece conectado de forma monolítica aos encontros, reduzindo a necessidade de juntas de dilatação e aparelhos de apoio. Essa configuração pode diminuir pontos de deterioração e custos de manutenção, mas transfere ao sistema solo-estrutura os deslocamentos horizontais associados principalmente às variações térmicas do tabuleiro (Burke, 2009; England et al., 2000; Civjan et al., 2013; Silva et al., 2023). O aterro adjacente ao encontro passa, portanto, a ser submetido a movimentos alternados de expansão e contração ao longo da vida útil da ponte, aqui denominados movimentos cíclicos.

A resposta cíclica do aterro depende da cinemática do encontro, da amplitude dos deslocamentos, da densidade relativa, da granulometria e do estado de compactação do material. Em modelos com areia solta ou seca, a alternância entre os estados ativo e passivo pode produzir rearranjo de partículas, contração volumétrica, densificação e acúmulo de tensões. Cosgrove e Lehane (2003) observaram contração significativa na região da cunha ativa, enquanto Tatsuoka et al. (2009), Huntley e Valsangkar (2013), Banks e Bloodworth (2018), Al-Qarawi et al. (2020) e Liu et al. (2022) discutiram a evolução das pressões e das deformações associadas aos deslocamentos repetidos do encontro. Esse mecanismo é associado ao ratcheting, no qual deformações permanentes se acumulam progressivamente, e ao conceito de shakedown, quando a resposta tende a uma condição de estabilização após os ciclos iniciais (Werkmeister; Dawson; Wellner, 2001).

A condição de campo, contudo, não é necessariamente representada por uma areia seca e não compactada. A construção de aterros estruturais envolve lançamento em camadas, controle da massa específica seca e ajuste do teor de água. Em orientações de execução de aterros reforçados, recomenda-se compactar o material próximo à umidade ótima e controlar o grau de compactação (FHWA, 2011). A compactação modifica a estrutura de vazios e, quando ocorre com água nos poros, pode produzir sucção matricial e coesão aparente. Assim, a condição de umidade do aterro deve ser tratada como parte do estado inicial do problema, e não como detalhe secundário.

Em solos não saturados, a sucção matricial corresponde à diferença entre a pressão do ar e a pressão da água nos poros. Essa variável influencia a tensão efetiva, a resistência ao cisalhamento e a rigidez do material (Fredlund; Morgenstern; Widger, 1978; Fredlund; Rahardjo, 1993; Vilar, 2021). A curva de retenção de água mostra como a sucção varia conforme muda a quantidade de água no solo, sendo essencial para compreender o comportamento de solos parcialmente saturados (Lu et al., 2020). Em uma areia compactada próxima à umidade ótima, a sucção pode conferir uma capacidade de sustentação que não seria esperada para uma areia seca e pouco coesiva.

Essa diferença pode alterar a interpretação do movimento cíclico. Durante o afastamento do encontro, correspondente à fase ativa, o aterro pode perder contato com a parede e formar um gap. Se a sucção contribuir para manter parcialmente a estrutura da cunha ativa, o material pode não colapsar



imediatamente em direção à parede durante a fase ativa do ciclo. No retorno passivo, a parede primeiro fecha o gap e depois comprime o aterro. Sob confinamento lateral, parte da deformação pode ser direcionada para cima, produzindo levantamento superficial e, simultaneamente, menor pressão mobilizada nos ciclos seguintes. Esse levantamento é tão relevante para a funcionalidade da via quanto o recalque: ambos podem gerar irregularidade longitudinal, desconforto ao usuário e perda de desempenho na transição entre a ponte e o aterro.

A utilização de desbastes de recapagem pode atuar como alternativa para reduzir as pressões no encontro e, ao mesmo tempo, dar destinação ambientalmente adequada a um material que seria um passivo ambiental. Os desbastes de recapagem de pneus são partículas alongadas geradas pela abrasão mecânica da banda de rodagem durante a preparação do pneu para receber uma nova camada. Por apresentarem, em geral, ausência de fios de aço e morfologia predominantemente acicular, diferem de outros derivados classificados pela ASTM D6270-2020, como migalhas de borracha, lascas de pneus e pedaços de pneus triturados. A destinação dos pneus inservíveis e o aproveitamento de seus derivados constituem uma demanda relevante no contexto brasileiro (Carvalho, 2016; IBAMA, 2024). Esses materiais apresentam baixa massa específica e elevada deformabilidade, características que podem reduzir o empuxo lateral e modificar a organização dos vazios, a distribuição de água e a deformação vertical do compósito. Estudos envolvendo migalhas, lascas e pedaços de pneus relatam redução de pressões e, em alguns casos, de recalques; entretanto, os resultados ainda são pouco uniformes e pouco conhecidos para desbastes de recapagem compactados na umidade ótima (Argyroudis et al., 2016a; Zadehmohamad et al., 2021; Zornberg et al., 2004).

Nesse contexto, este trabalho combina revisão crítica e análise exploratória de resultados de caracterização e de ensaios cíclicos de modelos reduzidos de aterros de areia e desbastes de pneus. Busca-se: i) caracterizar os materiais e as misturas; ii) discutir a influência do teor de desbastes sobre a compactação, a massa específica seca e a organização dos vazios; iii) confrontar o comportamento observado sob movimentos cíclicos com o regime clássico de ratcheting descrito para materiais secos ou soltos; iv) interpretar a possível participação da umidade ótima e da sucção matricial na formação de gap, na redução das pressões laterais e no levantamento superficial; e v) apresentar evidências preliminares obtidas por curva de retenção de água e tomografia computadorizada, definindo etapas futuras para validação da hipótese hidromecânica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi adotada uma abordagem integrativa, combinando revisão crítica da literatura e análise exploratória dos resultados de caracterização, curva de retenção de água, tomografia computadorizada e ensaios cíclicos de modelos reduzidos. Foram considerados estudos experimentais, numéricos e de modelagem física sobre: (i) encontros de pontes integrais submetidos a movimentos cíclicos; (ii) comportamento de aterros secos, soltos ou compactados; (iii) solos não saturados e sucção matricial; e (iv) emprego de resíduos de pneus em aterros e estruturas de contenção. A análise considerou, para cada estudo, a condição de umidade e de compactação, o tipo de movimento da parede, o tipo e o teor de resíduo e as respostas medidas em termos de pressão lateral, deformação, recalque, levantamento e formação de gap.

Foram utilizados uma areia fina proveniente de depósito eólico de paleodunas do campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e desbastes de recapagem de pneus, sem fios de aço, classificados como tire buffings conforme a ASTM D6270-20. A areia foi seca ao ar e peneirada para remoção de impurezas; os desbastes foram peneirados em abertura de 3,36 mm. Os desbastes são provenientes da abrasão da banda de rodagem de pneus durante a recapagem e, por isso, apresentam forma alongada, baixa massa específica e elevada deformabilidade. A areia foi classificada como mal graduada (SP), com massa específica dos grãos $\rho_s = 2,74 \text{ g/cm}^3$, $CU = 1,95$, $CC = 0,99$ e $D_{50} = 0,31 \text{ mm}$; para os desbastes, o diâmetro médio foi aproximadamente 2,00 mm (ASTM, 2020; Tire Industry Project, 2019).

A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento conforme a ABNT NBR 7181:2016. A massa específica dos grãos foi determinada conforme a ABNT NBR 6508:2016. Os índices de vazios máximo e mínimo da areia foram obtidos conforme as normas ABNT NBR 12004:2021 e ABNT NBR 12051:2021, resultando em $e_{\text{máx}} = 0,84$ e $e_{\text{mín}} = 0,64$. Esses valores caracterizam a faixa de compacidade da areia pura; eles não devem ser transferidos diretamente para as misturas, pois a introdução dos desbastes altera a massa específica dos sólidos, a geometria dos vazios e a relação entre massa e volume.

Para a determinação de $e_{\text{máx}}$, a areia seca foi lançada cuidadosamente em molde cilíndrico de volume conhecido, por meio de funil, com altura de queda aproximadamente constante, e o excesso foi rasado. Para a $e_{\text{mín}}$, a areia foi submetida à vibração vertical em mesa vibratória durante 10 min. A massa específica dos sólidos e a massa do material no molde foram utilizadas no cálculo dos índices de vazios.

As curvas de compactação foram determinadas pelo ensaio Proctor Normal, conforme a ABNT NBR

7182:2016. Para cada dosagem ($\chi = 0\%, 10\%, 20\%, 30\%$ e 40% em massa), foram preparados pelo menos 3 kg de material, compactados em três camadas com 26 golpes por camada. O teor de água foi iniciado próximo de 7% e aumentado em incrementos de aproximadamente 2% até a identificação do ramo úmido. O procedimento permitiu obter $\gamma_{d,max}$ e w_{ot} de cada mistura. O grau de compactação foi calculado pela Equação 1. Nos modelos cíclicos, essas grandezas foram usadas para calcular as massas de solo, desbastes e água por camada, com grau de compactação alvo de 90%; a compactação foi realizada manualmente em quatro camadas de 50 mm, totalizando $h = 200$ mm.

$$GC = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \times 100 \quad (1)$$

A dosagem foi definida pela relação dada pela Equação 2, em que M_p é a massa de desbastes e M_s é a massa de solo seco. O teor de água gravimétrico das amostras foi calculado pela Equação 3, em que M_{us} é a massa do conjunto úmido mais anel, M_{ss} é a massa do conjunto seco mais anel e M_t é a massa do anel. Essas relações permitiram controlar a quantidade de água e de desbastes em cada mistura.

$$\chi = \frac{M_p}{M_p + M_s} \times 100 \quad (2)$$

$$w = \frac{M_{us} - M_{ss}}{M_{ss} - M_t} \quad (3)$$

Como a hipótese do trabalho relaciona o estado de compactação à sucção matricial, a curva de retenção de água foi determinada preliminarmente em amostras moldadas em anéis metálicos e previamente saturadas. Foram analisadas as sucções de 0, 10, 33, 40, 50 e 100 kPa. O ponto de 0 kPa correspondeu à condição saturada de referência; os pontos de 10, 33 e 40 kPa foram obtidos em mesa de tensões e os de 50 e 100 kPa em câmara de Richards, pelo princípio da translação de eixos, conforme a ASTM D6836-16. Após o equilíbrio em cada estágio, as amostras foram pesadas e, ao final, secas em estufa para determinação da massa de sólidos. O conteúdo gravimétrico de água foi calculado pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco, sendo expresso em kg/kg. Quando necessário, os valores foram convertidos para conteúdo volumétrico de água, expresso em m^3/m^3 .

Para investigar a estrutura interna do compósito e obter evidências sobre a organização dos vazios após a compactação, foi realizada tomografia computadorizada em uma amostra preparada com 20% de desbastes, antes da aplicação dos ciclos, com resolução nominal de 70 μm . A segmentação do volume analisado permitiu distinguir a matriz arenosa, os desbastes e as regiões de vazios, preservando separadas as fases sólida e vazia. A análise quantitativa foi conduzida apenas sobre a classe de vazios, de modo a evitar que a fase borracha fosse interpretada como poro. Essa abordagem permitiu

avaliar a porosidade segmentada e a distribuição de diâmetros dos vazios na amostra analisada, oferecendo uma referência inicial da estrutura interna do compósito na condição compactada.

Embora a tomografia realizada nesta etapa tenha caráter exploratório e se refira a uma única dosagem, ela contribui para a interpretação do comportamento mecânico ao permitir visualizar a heterogeneidade espacial dos vazios e a interação geométrica entre a matriz arenosa e os desbastes. Em etapas futuras, a aplicação do mesmo protocolo em amostras antes e depois da ciclagem poderá permitir comparações pareadas da estrutura interna, incluindo alterações na distribuição de vazios, na conectividade dos poros e em possíveis rearranjos induzidos pelo carregamento cíclico.

Nos ensaios cíclicos analisados, foi utilizada uma caixa rígida instrumentada com face móvel capaz de girar em torno da base. A caixa possuía dimensão cúbica de 300 mm de lado, dois sensores de pressão instalados junto à face móvel, posicionados a 51,75 mm (SPI) e 151,5 mm (SPS) da base, e dois transdutores lineares para o controle do deslocamento. Foram avaliados cinco teores de desbastes, amplitudes relativas $d/h = 0,4\%$ e $1,0\%$ e 50 ciclos por ensaio, totalizando oito ensaios, conforme a configuração laboratorial desenvolvida para o estudo de aterros de encontros sob carregamento cíclico (Lima, 2024). A Figura 1 apresenta o aparato, a posição dos sensores e os sentidos ativo e passivo do movimento da parede.

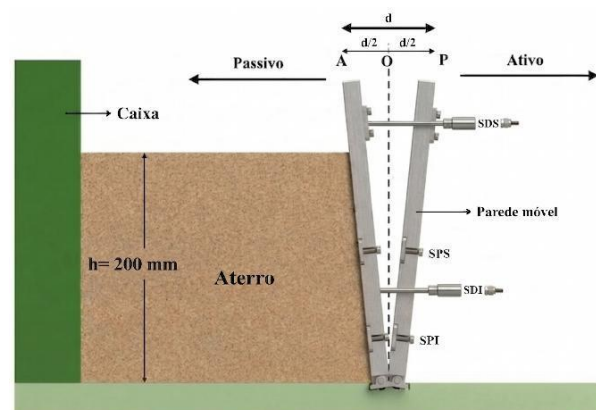


Figura 1. Representação esquemática da caixa de ensaios, com os sentidos ativo e passivo do movimento da parede.

O coeficiente de empuxo lateral (K) foi calculado conforme Equação 4, em que σ_h é a pressão lateral medida na fase passiva e σ_{v0} é a tensão vertical geostática inicial no nível do sensor, estimada a partir do peso específico natural inicial do aterro e da profundidade do sensor em relação à superfície.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_{v0}} \quad (4)$$

A curva de retenção de água e a análise tomográfica são apresentadas como resultados preliminares do programa experimental. A curva é usada para discutir a condição de sucção associada à umidade de compactação; a tomografia é usada para verificar a estrutura de vazios e a distribuição de diâmetros na amostra com 20% de desbastes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura clássica sobre encontros de pontes integrais mostra que os movimentos térmicos podem mobilizar sucessivamente estados ativo e passivo no aterro. Conforme indicado na Figura 1, no afastamento da parede ocorre a fase ativa; no retorno, a parede avança contra o aterro e mobiliza a fase passiva. Em materiais granulares secos e pouco compactados, a fase ativa favorece o deslocamento da cunha em direção ao espaço criado atrás da parede. Na fase passiva, o encontro retorna e impõe compressão ao material que se deslocou. Como o caminho de ida não é completamente desfeito no caminho de volta, ocorre acúmulo de deformações permanentes (Cosgrove; Lehane, 2003; England et al., 2000; Tatsuoka et al., 2009).

Esse processo pode ser acompanhado por aumento das pressões laterais, densificação próxima ao encontro e desenvolvimento de recalques na superfície. Ensaios em centrífuga e observações de campo mostram que a resposta depende das condições de contorno, da altura do aterro e da interação entre o encontro e o material adjacente (Ng; Springman; Norrish, 1998; Lawver et al., 2000). A amplitude do movimento controla a quantidade de deformação mobilizada em cada ciclo. Quando a parede rotaciona em torno de um eixo localizado na base, as maiores pressões podem se concentrar na região superior do encontro (Huntley; Valsangkar, 2013; Banks; Bloodworth, 2018; Al-Qarawi et al., 2020; Liu et al., 2022). Por isso, estudos realizados com materiais secos ou soltos são fundamentais para estabelecer o mecanismo de referência, mas não são suficientes para representar um compósito já densificado pela compactação, no qual há menor espaço para novas densificações e a sucção pode contribuir para a coesão aparente e para a manutenção da estrutura do aterro.

Em relação à compactação, ela não representa apenas um aumento da massa específica. Ela reorganiza a estrutura de vazios, altera o contato entre partículas e define o estado inicial a partir do qual o carregamento cíclico será aplicado. Em materiais granulares, o ponto de máxima massa específica seca corresponde a uma condição de umidade ótima para determinada energia de compactação. Na prática, especificações de aterros estruturais controlam a umidade próxima desse valor e o grau de compactação, ainda que os limites exatos dependam do material e do projeto (FHWA, 2011).

Quando a amostra compactada não está saturada, a água forma meniscos entre as partículas e produz pressão de água inferior à pressão do ar. A diferença entre essas pressões gera sucção matricial. A curva de retenção de água permite determinar como essa sucção varia com o teor de água e com o grau de saturação. Sem essa curva, a coesão aparente é apenas inferida a partir do comportamento observado, não quantificada. Essa relação é particularmente importante em materiais arenosos, nos quais pequenas variações no teor de água podem produzir mudanças expressivas na sucção e na coesão aparente (Fredlund; Morgenstern; Widger, 1978; Fredlund; Rahardjo, 1993; Lu et al., 2020).

A sucção também pode modificar a cinemática da cunha ativa. Em uma areia seca e solta, o afastamento da parede tende a promover a queda e o rearranjo do material, seguidos de densificação durante a repetição dos ciclos. Em uma areia compactada com sucção, a estrutura pode permanecer parcialmente autossustentada durante o afastamento. Essa condição pode favorecer a formação ou a manutenção parcial de gap. No ciclo seguinte, o fechamento da lacuna consome parte do deslocamento passivo, reduzindo a parcela disponível para mobilizar um novo pico de pressão.

Tabela 1. Síntese conceitual dos regimes de comportamento discutidos.

Estado do aterro	Mecanismo dominante	Resposta esperada
Areia seca e solta	Rearranjo e contração da cunha ativa	Densificação, recalque e possível aumento de pressão
Areia compactada sem determinação da sucção	Estado inicial denso, mas sucção desconhecida	Pressão pode estabilizar ou diminuir; mecanismo não quantificado
Areia compactada próxima à umidade ótima	Sucção e coesão aparente podem preservar o gap	Fechamento do gap, levantamento e alívio de pressão
Areia com desbastes de pneus	Menor peso específico e maior deformabilidade	Menor pressão, mas possível aumento das deformações verticais

Caracterização e compactação

A curva granulométrica confirma a diferença de escala entre os materiais (Figura 2). A areia concentra-se na faixa de areia fina a média, enquanto os desbastes apresentam distribuição mais ampla e diâmetro médio cerca de seis vezes maior. A limitação dos desbastes à

abertura de 3,36 mm reduziu a razão entre o maior tamanho de partícula e a altura do modelo, mantendo as inclusões compatíveis com a escala do ensaio.

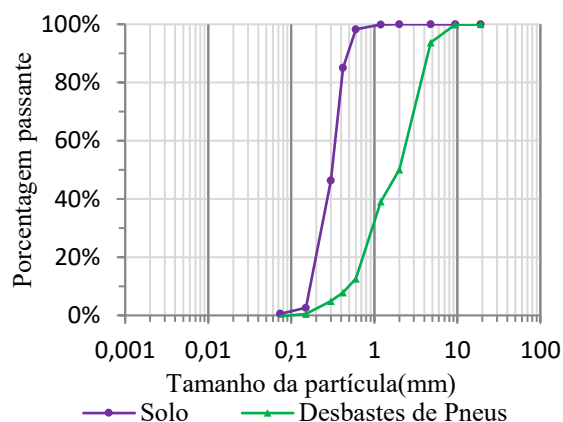


Figura 2. Distribuição granulométrica do solo e dos desbastes de pneus.

A incorporação de desbastes deslocou as curvas de compactação para menores valores de massa específica seca máxima, indicando redução progressiva de $\gamma_{d,máx}$ com o aumento do teor de borracha na mistura, conforme mostra a Figura 3.

A umidade ótima não apresentou variação monotônica: reduziu em $\chi = 10\%$ e aumentou nos teores mais elevados. Assim, não é adequado afirmar que a adição de desbastes sempre aumenta a umidade ótima; esse aumento foi observado apenas a partir das dosagens intermediárias (Tabela 2).

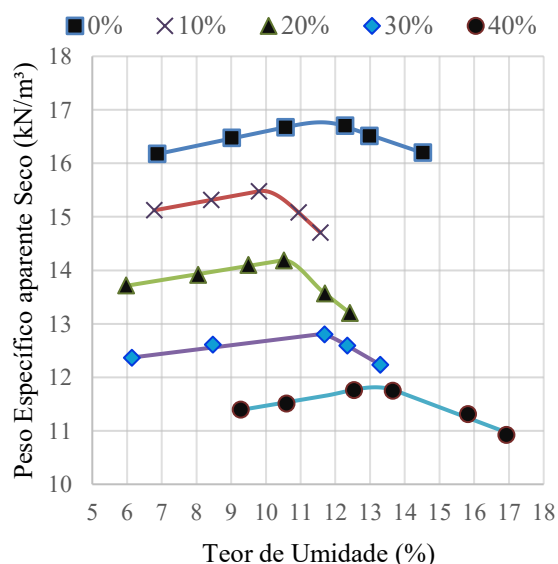


Figura 3. Curvas de compactação do solo puro e das misturas com diferentes teores de desbastes de pneus.

Nos resultados do presente estudo, os desbastes de recapagem apresentaram elevação superficial, especialmente para teores iguais ou superiores a 20%. Essa resposta difere da redução de recalques

observada em modelos com fragmentos de pneus e indica que o tipo de resíduo, o teor, a preparação do aterro, a umidade e a cinemática do modelo controlam o comportamento (Lima, 2024; Zornberg et al., 2004; Baykal; Edinçliler; Saygılı, 2010).

Tabela 2. Parâmetros de compactação.

χ (%)	$\gamma_{d, máx}$ (kN/m³)	$w_{ót}$ (%)
0	16,8	11,58
10	15,5	9,91
20	14,2	10,5
30	12,8	11,53
40	11,8	13,15

Os índices de vazios $e_{máx} = 0,84$ e $e_{min} = 0,64$ apresentados na caracterização referem-se à areia pura. Não foi realizada, nesta etapa, uma determinação pareada dos índices de vazios das cinco misturas, pois a massa específica dos sólidos da fase borracha, o volume global de cada compósito e a segmentação tomográfica equivalente ainda não foram obtidos para todas as dosagens. Por essa razão, a comparação entre os teores de pneus é feita, neste trabalho, com base na massa específica seca, na umidade ótima e na porosidade segmentada da amostra submetida ao ensaio de tomografia, sem converter diretamente a porcentagem de vazios detectada em índice de vazios global.

Nos ensaios cíclicos analisados, os picos de pressão lateral apresentaram tendência de redução ao longo dos ciclos em todas as configurações. Os valores mínimos tenderam a zero, sugerindo perda de contato entre o aterro e a parede durante a fase ativa. A adição de desbastes reduziu os coeficientes de empuxo de pico, enquanto os deslocamentos verticais superficiais foram predominantemente de elevação. A elevação aumentou com o teor de pneus e tornou-se mais acentuada a partir de 20%. Para a amplitude $d/h = 1,0\%$, a inclusão de 10% de desbastes correspondeu a uma redução média de aproximadamente 16% no coeficiente de empuxo, em relação ao solo puro.

Esse conjunto de observações é importante porque não corresponde ao comportamento mais simples esperado para uma areia seca sujeita ao ratcheting. O aterro não apresentou apenas densificação progressiva e aumento de pressão. Ocorreu uma combinação de afastamento da parede, redução dos picos de pressão e deslocamento vertical ascendente. A formação do gap é compatível com a redução das pressões mobilizadas, enquanto o levantamento indica que a deformação passiva não se converteu integralmente em recalque. Embora a elevação possa aliviar a pressão sobre a parede, ela também pode comprometer a regularidade da via tanto quanto o recalque, devendo ser tratada como requisito de serviço.

Para detalhar a evolução da resposta cíclica, a Figura 4 apresenta os picos do coeficiente de empuxo lateral medidos no sensor de pressão superior (SPS) ao longo dos 50 ciclos, para amplitude de deslocamento de 2,0 mm ($d/h = 1,0\%$). A comparação reúne a areia pura e os compósitos com 10%, 20%, 30% e 40% de desbastes de pneus.

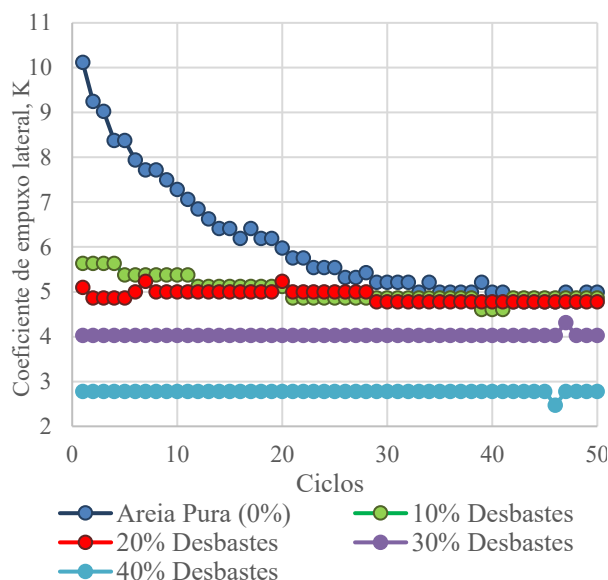


Figura 4. Comparação dos coeficientes de empuxo lateral ao longo dos ciclos para os ensaios com amplitude de 2,0 mm no sensor de pressão superior ($d/h = 1,0\%$).

A Figura 4 evidencia a redução dos coeficientes de empuxo lateral com a incorporação dos desbastes e a tendência de estabilização mais rápida dos compósitos em comparação com a areia pura. A maior variação nos primeiros ciclos é compatível com a mobilização inicial da resistência passiva e com a acomodação progressiva do material junto à face móvel. Com o avanço da ciclagem, a menor oscilação dos compósitos sugere que parte do deslocamento imposto passou a ser absorvida pela deformabilidade dos desbastes e pela reorganização da interface. Esse resultado é compatível com a formação e o fechamento progressivo de gap, mas não comprova, isoladamente, o papel da sucção matricial. A validação dessa interpretação depende da análise conjunta dos ensaios cíclicos, da curva de retenção de água e, complementarmente, de evidências sobre a estrutura interna do compósito obtidas por tomografia.

Com base na literatura e nos resultados dos ensaios cíclicos, propõe-se que o estado de compactação e a sucção possam produzir uma mudança de regime. No regime seco, o ciclo ativo-passivo favorece circulação de partículas, densificação e aumento das pressões. No regime compactado e parcialmente saturado, a sucção pode manter a cunha ativa parcialmente estável após o afastamento da parede. O movimento passivo seguinte

é então utilizado inicialmente para fechar o gap. Como o aterro está confinado lateralmente, a deformação restante pode ocorrer predominantemente na direção vertical, resultando em levantamento.

A hipótese não significa que toda areia compactada apresentará alívio de pressão ou levantamento. O resultado depende da magnitude da sucção, da densidade, da amplitude do movimento, da drenagem, da rugosidade da parede e da deformabilidade do compósito. O papel dos desbastes pode ser duplo: reduzir a pressão por deformabilidade e baixo peso específico, mas ampliar o deslocamento vertical por aumentar a compressibilidade e modificar a estrutura de vazios.

A curva de retenção de água é, portanto, o elo experimental que ainda precisa ser quantificado na condição exata de compactação dos modelos. A partir dela será possível estimar a sucção correspondente à umidade ótima de cada dosagem, comparar os compósitos em uma base hidromecânica e verificar se a dosagem que apresenta maior alívio de pressão também apresenta uma condição de sucção capaz de preservar o gap. Estudos de curva de retenção em materiais arenosos modificados mostram que a adição de material polimérico ou borracha pode alterar a pressão de entrada de ar, a água retida e a estrutura de poros, reforçando a necessidade de medir essa relação para o compósito estudado.

Os ensaios de retenção de água reuniram três repetições por dosagem e determinações de umidade gravimétrica e volumétrica para sucções nominais de 0, 10, 33, 40, 50 e 100 kPa, conforme Tabela 3. A resposta média mostra queda acentuada do conteúdo volumétrico de água entre 0 e 10 kPa, seguida de redução mais gradual entre 10 e 100 kPa. Na areia pura, o conteúdo volumétrico médio de água variou de $0,3562 \text{ m}^3/\text{m}^3$, em 0 kPa, para $0,0464 \text{ m}^3/\text{m}^3$, em 10 kPa, e $0,0260 \text{ m}^3/\text{m}^3$, em 100 kPa. Na mistura com 20% de desbastes, os valores correspondentes foram $0,3460 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0,0622 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,0394 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Tabela 3. Valores médios preliminares do conteúdo volumétrico de água (CVA) por sucção (m^3/m^3).

χ	CVA a 0 kPa	CVA a 10 kPa	CVA a 33 kPa	CVA a 40 kPa	CVA a 50 kPa	CVA a 100 kPa
0	0,3562	0,0464	0,0351	0,0335	0,0318	0,0260
10	0,3517	0,0550	0,0499	0,0483	0,0467	0,0374
20	0,3460	0,0622	0,0584	0,0574	0,0562	0,0394
30	0,3790	0,0607	0,0576	0,0571	0,0567	0,0522
40	0,3831	0,0794	0,0756	0,0752	0,0738	0,0573

Os valores de sucção considerados foram 0, 10, 33, 40, 50 e 100 kPa. A queda mais acentuada ocorre entre a condição saturada e 10 kPa, seguida de redução mais gradual nas sucções subsequentes, o que indica a sensibilidade inicial do compósito à perda de água, comportamento esperado em materiais mais arenosos.

A amostra preparada com 20% de desbastes foi analisada por tomografia computadorizada com resolução nominal de 70 μm , ilustrado na Figura 5. A reconstrução volumétrica permitiu identificar a presença das inclusões de borracha e das regiões segmentadas como vazios, fornecendo uma visualização direta da estrutura interna do compósito na condição compactada. Para a quantificação da distribuição de diâmetros, foi utilizado o arquivo correspondente apenas à classe de vazios, mantendo separadas as fases de borracha e de poros. O perfil de porosidade segmentada associado à análise de vazios apresentou média de 13,99%, com faixa de 8,84% a 21,53% ao longo de 2.320 fatias. A distribuição volume-diâmetro apresentou maior contribuição nos intervalos próximos de 0,22 a 0,32 mm, com volume máximo no bin centrado em aproximadamente 0,271 mm. Esses resultados indicam heterogeneidade espacial dos vazios na amostra analisada e mostram o potencial da tomografia para investigar a organização interna do compósito após a compactação. Nesta etapa, entretanto, os valores obtidos devem ser interpretados como porosidade segmentada da amostra analisada, e não como índice de vazios global do compósito.

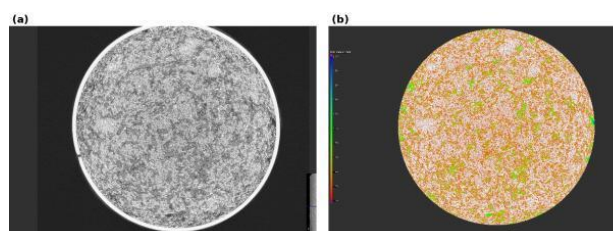


Figura 5. Tomografia da mistura com $\chi = 20\%$: (a) imagem reconstruída; (b) vazios e pneus são representados pelas cores vermelha e verde.

Em perspectiva, a repetição desse procedimento em amostras preparadas com o mesmo protocolo, antes e depois da aplicação dos ciclos, pode permitir comparações diretas da evolução da estrutura interna do compósito. Esse tipo de abordagem poderá indicar se houve redistribuição dos vazios, alteração na conectividade dos poros ou rearranjo local induzido pela ciclagem, contribuindo para relacionar as respostas microscópicas observadas por tomografia às variações macroscópicas de pressão lateral e levantamento superficial.

Programa experimental necessário para validar a interpretação: A próxima etapa deve medir a curva de

retenção de água das cinco dosagens, preferencialmente com amostras preparadas na mesma condição de massa específica e umidade utilizada nos modelos físicos. Os resultados devem ser expressos em teor de água gravimétrico e volumétrico, grau de saturação e sucção matricial. O ajuste por van Genuchten ou Fredlund-Xing permitirá obter parâmetros comparáveis entre as dosagens e marcar, em cada curva, a condição correspondente à umidade ótima.

O registro dos deslocamentos superficiais e das pressões durante os ciclos deve ser mantido em conjunto com a curva de retenção. A tomografia pode ser utilizada para investigar a estrutura de vazios, desde que as amostras de areia e de compósito sejam preparadas com o mesmo protocolo, tenham dimensões comparáveis e sejam processadas com o mesmo procedimento de segmentação. Estudos de tomografia de solos compactados mostram que o limiar de segmentação depende da energia de compactação, do teor de areia e do tamanho da amostra (Ramesh; Thyagaraj, 2022).

CONCLUSÕES

A revisão e os resultados analisados indicam que o ratcheting, a densificação e o aumento de pressões descritos para aterros granulares secos não devem ser automaticamente transferidos para aterros compactados próximos à umidade ótima. A compactação define uma estrutura inicial densa e, quando o material permanece parcialmente saturado, a sucção matricial pode conferir coesão aparente e alterar a cinemática do sistema solo-encontro.

Nos ensaios cíclicos, observou-se tendência de redução dos picos de pressão, perda de contato durante o movimento ativo e elevação superficial do aterro. A formação do gap e o fechamento progressivo da lacuna oferecem uma interpretação mecanística para a estabilização das pressões e para o direcionamento de parte da deformação para cima. O levantamento, entretanto, não deve ser interpretado como resposta benéfica por si só, pois pode comprometer a regularidade e a condição de serviço da via tanto quanto o recalque.

Nos compósitos com desbastes de pneus, a redução da massa específica e o aumento da deformabilidade podem aliviar as pressões laterais, mas também intensificar deslocamentos verticais. Nos dados analisados, a inclusão de 10% de desbastes reduziu em aproximadamente 16% o coeficiente de empuxo para $d/h = 1,0\%$. A elevação superficial tornou-se mais acentuada a partir de 20% de desbastes, indicando que a faixa entre 10% e 20% apresentou, nos dados analisados, o comportamento mais equilibrado entre redução das pressões laterais e limitação dos deslocamentos verticais. Essa indicação é preliminar e



não deve ser interpretada, nesta etapa, como critério de projeto.

A curva de retenção de água constitui o principal ensaio para verificar se a sucção correspondente à umidade de compactação é suficiente para preservar o gap. A tomografia complementa essa análise ao permitir visualizar a estrutura segmentada de vazios e a distribuição de diâmetros detectados na amostra analisada, oferecendo uma referência inicial da organização interna do compósito na condição compactada. Em etapas futuras, sua aplicação em amostras antes e depois da ciclagem poderá contribuir para verificar alterações estruturais associadas ao carregamento cíclico. A validação exige amostras pareadas de areia e compósito, preparadas com a mesma energia, umidade, geometria, resolução e procedimento de segmentação, além do registro simultâneo de pressão, deslocamento e levantamento durante a ciclagem.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil (Proc. 300273/2025-8), pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-QARAWI, A.; LEO, C. J.; LIYANAPATHIRANA, D. S. Effects of wall movements on performance of integral abutment bridges. *International Journal of Geomechanics*, v. 20, n. 2, p. 04019157, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001559.
- ARGYROUDIS, S.; PALAIOCHORINOU, A.; MITOULIS, S. A.; PITILAKIS, D. Use of rubberised backfills for improving the seismic response of integral abutment bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 14, p. 3573–3590, 2016a. DOI: 10.1007/s10518-016-0018-1.
- ARGYROUDIS, S. et al. Seismic response of sand with rubber inclusions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 84, p. 219–229, 2016b.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6270-20: Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken, 2020.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6836-16: Standard test methods for determination of soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge. West Conshohocken, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo — análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Solo — ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12004: Solo — determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12051: Solo — determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2021.
- BANKS, J. R.; BLOODWORTH, A. G. Lateral stress profiles on integral bridge abutments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering*, v. 171, n. 3, p. 155–168, 2018. DOI: 10.1680/jbren.17.00017.
- BAYKAL, G.; EDİNCİLİLER, A.; SAYGILI, A. Utilization of scrap tires in civil engineering projects as a construction material. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING*, 8., 2008, Famagusta. *Proceedings [...]*. Famagusta: Eastern Mediterranean University, 2010.
- BURKE, M. P. *Integral and semi-integral bridges*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.
- CARVALHO, J. C. Análise de viabilidade técnica e econômica do uso de pneus inservíveis em aterros rodoviários. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- CIVJAN, S. A.; MAGUIRE, M.; GARCIA, A. Integral abutment bridge response due to thermal loading and soil-structure interaction. *Journal of Bridge Engineering*, v. 18, n. 2, p. 119–131, 2013.
- COSGROVE, E.; LEHANE, B. Cyclic loading of loose backfill placed adjacent to integral bridge abutments. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, v. 3, n. 3, p. 9–16, 2003.
- ENGLAND, G. L.; TSANG, N. C. M.; BUSH, D. I. *Integral bridges: a fundamental approach to the time-temperature loading problem*. London: Thomas Telford, 2000.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Geosynthetic reinforced soil integrated bridge*



- system interim implementation guide. FHWA-HRT-11-026. Washington, 2011.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 15, n. 3, p. 313–321, 1978.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley, 1993.
- HUNTLEY, S. A.; VALSANGKAR, A. J. Field monitoring of earth pressures on integral bridge abutments. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 50, n. 8, p. 841–857, 2013. DOI: 10.1139/cgj-2012-0440.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Relatório de pneumáticos 2024: destinação de pneus inservíveis no Brasil. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/arquivos/relatoriopneumaticos/20250410_Anexo_23022971_Relatorio_Pneumatico_2024.pdf. Acesso em: fev. 2026.
- LAWVER, A. et al. Field performance of an integral abutment bridge. *Transportation Research Record*, n. 1740, p. 108–117, 2000.
- LIMA, A. C. L. Desenvolvimento de equipamento laboratorial para estudo da resposta do solo de aterro de encontros de pontes integrais sujeitos a movimentos laterais cíclicos. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.
- LIU, H.; HAN, J.; PARSONS, R. L. Settlement and horizontal earth pressure behind model integral bridge abutment induced by simulated seasonal temperature change. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 148, n. 6, p. 04022043, 2022.
- LU, N.; GODT, J. W. et al. Unsaturated soil mechanics: fundamental challenges, breakthroughs, and opportunities. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 5, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002233.
- MITOULIS, S.; ARGYROUDIS, S.; PITILAKIS, K. Green rubberised compressible inclusions to enhance the longevity of integral abutment bridges. In: EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY, 2., 2014, Istanbul. Proceedings [...]. Istanbul, 2014.
- NG, C. W. W.; SPRINGMAN, S. M.; NORRISH, A. R. M. Centrifuge modelling of spread-base integral bridge abutments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 5, p. 376–388, 1998.
- RAMESH, S.; THYAGARAJ, T. Segmentation of X-ray tomography images of compacted soils. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, v. 8, 2022. DOI: 10.1007/s40948-021-00322-w.
- SILVA, P. H. S.; COSTA, Y. D. J.; WALTER, J. R.; KOUCHAKI, B. M.; ZORNBERG, J. G.; COSTA, C. M. L. Numerical evaluation of a semi-integral bridge abutment under cyclic thermal movements. *Transportation Geotechnics*, v. 39, p. 100938, 2023. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100938.
- TATSUOKA, F. et al. Earth pressure and deformation of backfill behind integral bridge abutments under cyclic thermal movements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2009. Proceedings [...]. 2009.
- TIRE INDUSTRY PROJECT. End of life tires: a framework for effective management systems. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2019.
- VILAR, O. M. Fundamentos da mecânica dos solos não saturados. São Carlos: EESC-USP, 2021.
- WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, v. 1757, n. 1, p. 75–81, 2001.
- ZADEHMOHAMAD, M.; BOLOURI BAZAZ, J.; RIAHIPOUR, R.; FARHANGI, V. Physical modeling of the long-term behavior of integral abutment bridge backfill reinforced with tire-rubber. *International Journal of Geo-Engineering*, v. 12, art. 36, 2021. DOI: 10.1186/s40703-021-00163-2.
- ZORNBERG, J. G.; COSTA, Y. D.; VOLLENWEIDER, B. Performance of prototype embankment built with tire shreds and nongranular soil. *Transportation Research Record*, n. 1874, p. 70–77, 2004. DOI: 10.3141/1874-08.