XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/23

Avaliação da melhoria do módulo de elasticidade de camadas granulares com geocélulas: seções experimentais em escala real em uma rodovia

L. X. Feng
Mestre, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), São Paulo, SP, Brasil, linfeng@usp.br

J. O. Avesani Neto
Professor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), São Paulo, SP, Brasil, avesani@usp.br

J. G. Zornberg
Professor, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas at Austin, TX, EUA, zornberg@mail.utexas.edu

RESUMO: Este artigo apresenta resultados de retroanálise a partir de trechos experimentais em escala real envolvendo camadas reforçadas com geocélula preenchidas com material granular, submetidas ao ensaio de deflexão in situ com viga Benkelman (BBT). Os ensaios de campo foram realizados durante a construção de uma rodovia no sul do país. Dois tipos de materiais granulares foram utilizados em seções de pavimento com e sem reforço. As medições de deflexão foram obtidas nas diferentes camadas da estrutura do pavimento utilizando o BBT. Os principais objetivos do programa foram: (1) retrocalcular os módulos de elasticidade, tanto nas camadas sem reforço quanto nas reforçadas; (2) determinar a melhoria no módulo, quantificada pelo Fator de Melhoria do Módulo (Modulus Imoprovement factor - MIF), decorrente do reforço com geocélula; (3) comparar os valores de MIF medidos com valores reportados na literatura sob condições semelhantes; e (4) avaliar a precisão de um método analítico disponível para estimar o MIF. Os resultados demonstraram melhoria significativa no módulo elástico dos materiais granulares com o uso de geocélulas, com valores de MIF variando de 2,6 a 3,3, dependendo do material de enchimento. Um método analítico utilizado para calcular o MIF apresentou boa capacidade preditiva, confirmando seu potencial de aplicação no projeto de pavimentos com camadas reforçadas por geocélulas.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Fator de Melhoria do Módulo (MIF), reforço de solos, reforço de pavimentos, ensaio de deflexão.

ABSTRACT: This article presents results from back-analysis of full-scale experimental sections involving granular material layers reinforced with geocells, subjected to in-situ deflection tests using the Benkelman Beam Test (BBT). The field tests were conducted during the construction of a highway in the southern region of the country. Two types of granular materials were used in pavement sections with and without reinforcement. Deflection measurements were obtained in the different layers of the pavement structure using the BBT. The main objectives of the program were: (1) to back-calculate the elastic moduli in both unreinforced and reinforced layers; (2) to determine the modulus improvement, quantified by the Modulus Improvement Factor (MIF), resulting from geocell reinforcement; (3) to compare the measured MIF values with those reported in the literature under similar conditions; and (4) to evaluate the accuracy of an available analytical method for estimating the MIF. The results demonstrated a significant improvement in the elastic modulus of the granular materials with the use of geocells, with MIF values ranging from 2.6 to 3.3, depending on the fill material. An analytical method used to calculate the MIF showed good predictive capability, confirming its potential for application in the design of pavements with geocell-reinforced layers.

KEYWORDS: Geosynthetics; Modulus Improvement Factor (MIF); soil reinforcement; pavement reinforcement; deflection test

1 INTRODUÇÃO

Geocélulas são geossintéticos com aplicações em engenharia civil que vão desde proteção contra erosão até reforço de solos (Biswas et al., 2024; Ghazvinian and Karami, 2023; Krishnaraj et al., 2023; Sawada et al., 2023). Sua implementação tem aumentado nos últimos anos devido à eficácia em resolver diversos problemas de engenharia, sobretudo aqueles relacionados ao reforço de solos para infraestrutura de transportes (Luo et al., 2023; Minchala et al., 2024; Punetha and Nimbalkar, 2022).

A melhoria das propriedades mecânicas do agregado de enchimento pode ser atribuída ao maior confinamento proporcionado pela estrutura em colmeia das geocélulas. Em particular, tensões residuais ficam "encapsuladas" dentro das células, fazendo com que a camada reforçada com geocélulas se comporte como uma "placa" pré-tensionada (J. O. Avesani Neto, 2019; Garcia and Avesani Neto, 2021). Além do confinamento lateral, as geocélulas aumentam a rigidez (módulo elástico) da camada granular não ligada (UGM) e, assim, melhoram o desempenho em estruturas de pavimento (Zornberg, 2017). Um parâmetro que representa essa capacidade é o Fator de Melhoria do Módulo (MIF), definido como a razão entre o módulo na camada reforçada por geocélula e o módulo na camada sem reforço (MIF = Er/Eun).

O MIF pode ser determinado por várias técnicas experimentais, incluindo ensaios laboratoriais em pequena e grande escala; pistas de ensaios em escala real; retroanálises de dados de monitoramento de estradas e ferrovias; e simulações numéricas, como análises pelo método dos elementos finitos (MEF). Tipicamente, valores de MIF variam entre 1,5 e 5,0 em experimentos laboratoriais, e entre 2,0 e 3,5 em testes de campo em escala real e retroanálises de obras (Pokharel et al., 2017; Ruge et al., 2020; Saride et al., 2022). Em termos de projeto, o uso do MIF é adequado porque permite inserir diretamente o módulo da camada reforçada no método mecanicista-empírico. Um método analítico para estimar o MIF foi desenvolvido por Garcia e Avesani Neto (2021), facilitando a incorporação das geocélulas em análises mecanicistas e em softwares baseados na Teoria do Sistema de Camadas Elasticas (TSCE).

Apesar do sucesso do MIF em diversos projetos, a falta de dados de desempenho em campo de pavimentos flexíveis reforçados com geocélulas tem limitado sua adoção. Diretrizes específicas para projeto e construção ainda não são amplamente disponíveis, principalmente pela escassez de dados em condições reais de operação. Para suprir essa lacuna, este artigo apresenta um resumo da dissertação de Feng (2024) e do artigo Feng et al. (2024) com retroanálises de deflexões medidas por BBT em camadas de UGM sem reforço e reforçadas com geocélulas, construídas dentro de uma estrutura de pavimento de rodovia. Um programa em escala real foi conduzido para avaliar os ganhos de rigidez em camadas típicas de base e sub-base. Um software baseado em TSCE foi empregado para determinar os módulos das camadas reforçadas e não reforçadas, quantificando as melhorias via MIF, e comparando com método analítico e com valores reportados na literatura.

2 ENSAIO EXPERIMENTAL EM ESCALA REAL

Zonas de ensaio em escala real foram instaladas em uma rodovia em construção na região Sul do Brasil. A área total tinha 170 m de comprimento e 12 m de largura e foi dividida em quatro zonas com combinações de camadas de base e sub-base sem reforço e reforçadas com geocélulas. Cada zona tinha 50 m de comprimento, permitindo avaliação detalhada por ensaio de viga Benkelman (BBT), conforme mostrado na Figura 1A.

A Zona 1 atuou como controle, com sub-base de 250 mm de macadame (CSS) e base de 150 mm de brita graduada (GBM), conforme Figura 1. As Zonas 2, 3 e 4 foram reforçadas com geocélula (Figura 1). Na Zona 2, a geocélula foi posicionada na sub-base (CSSg). Nas Zonas 3 e 4, a geocélula foi posicionada na base (GBMg).

Ensaios BBT foram realizados em séries: Série A (sobre o subleito), Série B/C (sobre CSS/GBM sem reforço) e Séries Bg/Cg (sobre CSSg/GBMg reforçadas com geocélula), de acordo com a Figura 1.

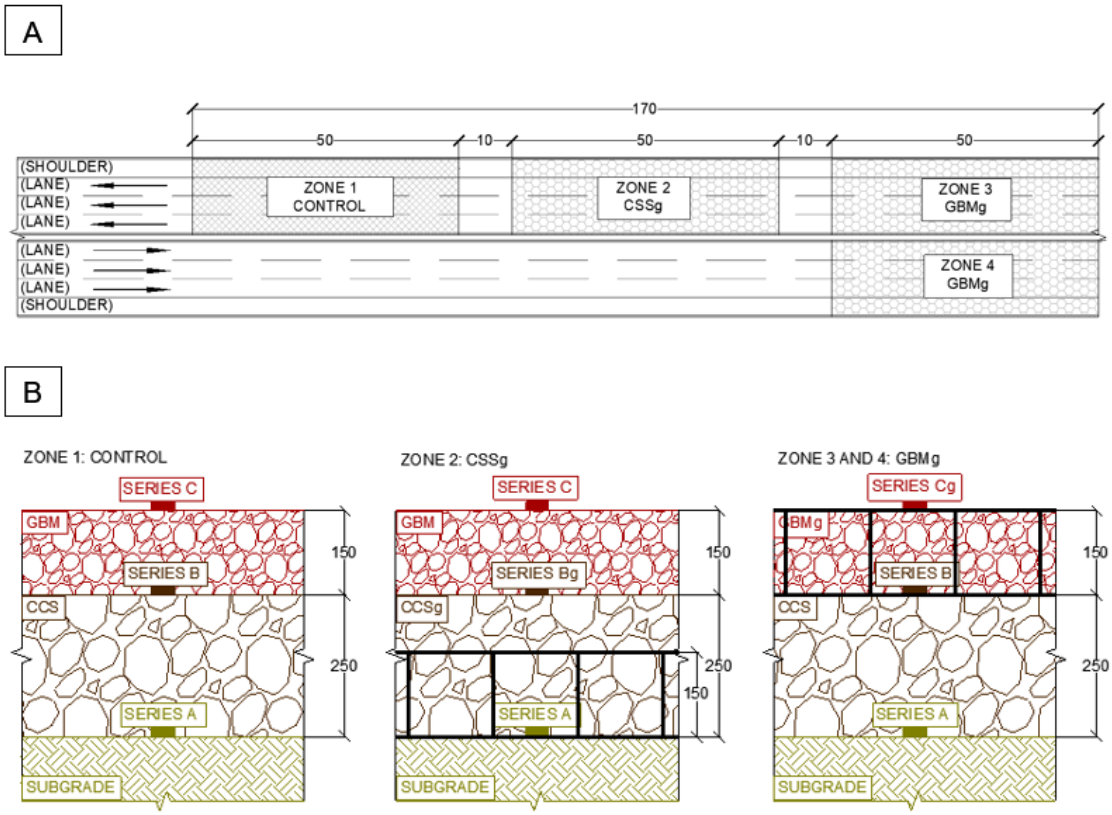


Figura 1. Trecho experimental. A) Vista em planta (medidas em metros). B) Seções transversais (medidas em milimetros) – Adaptado de Feng et al. (2024).

2.1 Subleito

O subleito corresponde ao material in situ do local: uma argila siltosa laterítica, com teor de umidade natural durante a construção de 1,55%, massa específica dos sólidos de 2,77 g/cm³, Limite de Liquidez (LL) de 77% e Índice de Plasticidade (IP) de 40%. O solo foi classificado como A-7-5 pela AASHTO e MH (silte de alta plasticidade) pela USCS. A sua curva granulométrica é mostrada na Figura 2.

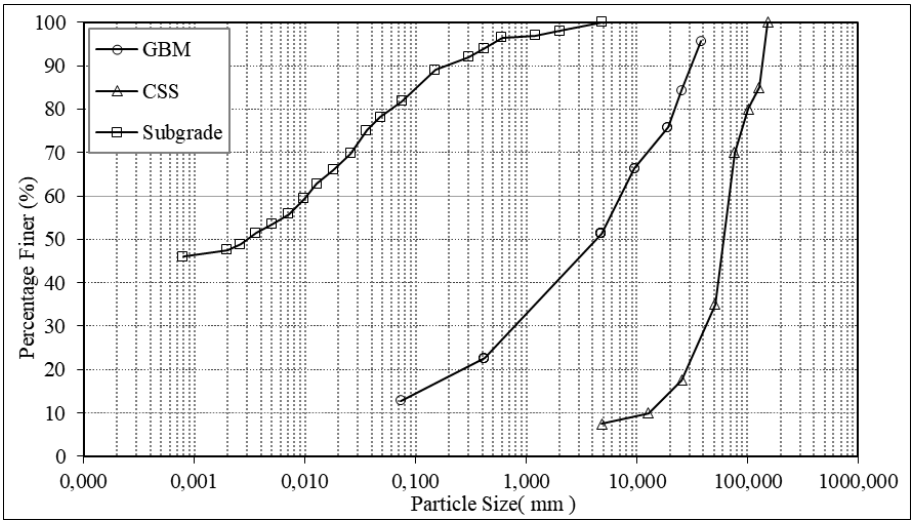


Figura 2. Curvas granulométricas dos solos utilizados neste estudo - adaptado de Feng et al. (2024).

2.2 Sub-base e base granular

A sub-base de macadame (CSS) era um agregado graúdo, comumente utilizado em rodovias brasileiras. Ela era composta por fragmentos angulares de brita de 12 a 85 mm, com boa durabilidade e caráter não reativo, classificada como A-1-a e GP, respectivamente pelos sistemas da AASHTO e USCS. Sua curva granulométrica é mostarda na Figura 2.

A base de brita graduada simples (GBM) foi classificada como A-1-a e GW, respectivamente pelos sistemas da AASHTO e USCS. A Figura 2 mostra sua curva granulométrica. Durante o processo de compactação, com alvo de 100% do Proctor Modificado, a massa específica seca máxima obtida foi 2,18 kg/cm³ e a umidade ótima 4,6%. O CBR no material, nessas condições, resultou em 102%..

2.3 Geocélula

A geocélula empregada, conforme especificação do fabricante, foi produzidas em PEAD (polietileno de alta densidade) com altura de 150 mm e abertura da celula com 224 mm de largura e 259 mm de comprimento quando totalmente abertas (área de 0,0289 m²). As paredes eram texturizadas e perfuradas (diâmetro máx. 10 mm), com área perfurada de cerca de 10%. O módulo de elasticidade do PEAD em pequenas deformações foi considertado como 700 Mpa. Um resumo das caracteristicas da geocélula é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características da geocélula.

Parâmetro	Valor
Material	PEAD
Altura da parede da célula (mm)	150
Dimensão expandida da célula (mm)	259 × 224
Área aberta da célula (m²)	0,0289
Diâmetro equivalente (mm)	192
Espessura da parede (mm)	1,65
Rigidez da geocélula (kN/m)	1155

2.4 Construção do trecho experimental e ensaios de viga Benkelman (BBT)

Todas as zonas foram projetadas com as mesmas camadas, materiais e espessuras, variando apenas o posicionamento da geocélula. Na Zona 1 (controle), executou-se os ensaios de BBT na Série A (subleito), depois sobre os 250 mm da CSS (Série B), e por fim sobre a GBM com 150 mm (Série C). Na Zona 2, a geocélula foi incorporada à CSS (Série Bg), mantendo Série A no subleito e Série C no GBM. Nas Zonas 3 e 4, a geocélula foi incorporada ao GBM (Série Cg), mantendo Série A (subleito) e Série B (CSS).

A compactação das camadas empregou rolo liso vibratório (2,1 m de largura), objetivando 100% de compactação relativa (Proctor Modificado), com 4 a 8 passadas e força centrífuga entre 133 e 234 kN. O controle de qualidade seguiu as espeficidações DNIT. O ensaio de BBT, amplamente usado no Brasil, foi conduzido com roda dupla de eixo simples, carga de 80 kN e pressão de 560 kPa, gerando duas cargas circulares equivalentes com espaçamento de 288 mm, de acordo com especificações rodoviárias brasileiras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Deflexões obtidas

Foram realizados um total de 219 BBT no trecho experimental, cerca de 55 em cada zona e 25 por Série. A Tabela 2 apresenta as faixas, valores médios e coeficientes de variação (COV) das deflexões por zona e camada (Série).

Tabela 2. Resultados de deflexão.

Série	Camada	Zonas	Faixa de deflexão (mm)	Deflexão média (mm)	COV
A	Subleito	1 a 4	1,15 a 6,29	3,05	36,3%
B	CSS	1, 3 e 4	0,83 a 2,12	1,51	22,3%
C	GBM	1 e 2	0,59 a 1,92	1,10	24,0%
Bg	CSSg (reforçado)	2	1,31 a 1,78	1,51	10,3%
Cg	GBMg (reforçado)	3 e 4	0,87 a 1,31	1,04	9,5%

As deflexões variaram de 0,59 a 6,29 mm, com COV entre 9,5% e 36,3%. Como esperado, maiores deflexões e desvios ocorreram no subleito, material de maior variabilidade conforme condições in situ. À medida que camadas mais rígidas eram adicionadas, as deflexões e o COV diminuíam. As camadas reforçadas com geocélula exibiram os menores COV, cerca de 55% inferiores aos das camadas sem reforço, indicando maior uniformidade.

Embora as médias de deflexão entre camadas sem e com reforço nem sempre mostrem diferenças marcantes (p.ex., B vs. Bg; C vs. Cg), a influência da deformabilidade do subleito limita inferências diretas a partir das deflexões superficiais. Assim, realiza-se a retroanálise em sistema elástico multicamadas para quantificar os módulos.

3.2 Retroanálise pelo sistema de multiplas camadas

As deflexões medidas estão diretamente correlacionadas aos deslocamentos obtidos pela Teoria do Sistema de Camadas Elasticas (TSCE), que relaciona tensões e deformações em função do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e espessura. No presente estudo, utilizou-se o software ELLEA1 (Levenberg, 2016), capaz de calcular deslocamentos, tensões e deformações em até cinco camadas sob duas cargas circulares de superfície, conforme metodologia de Avesani Neto e Rodrigues (2021) e Zipoli e Avesani Neto (2022).

Os parâmetros de entrada incluíram espessuras e coeficientes de Poisson (ν) por camada, além da posição, dimensões e magnitude da carga do BBT. Foram obtidos o módulo de superfície, ou equivalente (Esuf), relativo a todas as camadas, e o módulo de elasticidade de cada camada (E), conforme mostrado na Tabela 3. A análise iterativa avançou das camadas inferiores para as superiores: primeiro ajustou-se o subleito (Série A), depois CSS (Série B), e assim por diante. Valores de ν foram adotados da literatura, com cifra de 0,25 para a camada reforçada com geocélula (Yoder and Witczak, 1975, Gottumukkala et al., 2023).

Tabela 3. Parâmetros de entrada por camada e módulos retrocalculados a partir dos ensaios de BBT.

Série	Camada	Zonas	Espessura (mm)	ν	Esuf (MPa)	E (MPa)
A	Subleito	1 a 4	∞	0,45	23	23
B	CSS	1, 3 e 4	250	0,35	49	283
C	GBM	1 e 2	150	0,35	67	215
Bg	CSSg (reforçado)	2	250	0,25	52	723
Cg	GBMg (reforçado)	3 e 4	150	0,25	76	656

Os valores de Esuf variaram de 23 a 76 MPa, sendo o menor no subleito e o maior sobre a camada de base reforçada com geocélula. À medida que camadas mais rígidas eram adicionadas, o Esuf aumentou. A sub-base CSS sem reforço resultou em Esuf = 49 MPa (>100% acima do subleito). Para GBM sem reforço, Esuf = 67 MPa (190% acima do subleito, 36% acima do CSS). Com geocélulas, CSSg apresentou Esuf = 52 MPa (126% acima do subleito, 6% acima do CSS) e GBMg Esuf = 76 MPa (230% acima do subleito, 55% acima do CSS, 13% acima do GBM).

Como o Esuf é incremental durante a construção e as espessuras/camada sobreposta diferem, comparações entre CSS e GBM devem ser qualitativas, inclusive sem e com a presença do reforço, visto que o subleito influencia diretamente no Esuf.

Para avaliar individualmente cada camada, a TSCE foi utilizada de sorte a individualizar os módulos de cada uma (E). Para o subleito (Série A), o módulo da camada resultou em 23 MPa. Para a CSS sem reforço (Série B), E foi igual a 283 MPa (médias das Zonas 1, 3 e 4), com variações por zona de 279, 308 e 263 MPa (COV < 10%). Para a GBM sem reforço (Série C), E = 215 MPa (média das Zonas 1 e 2), com 206 e 223 MPa por zona (COV ~5%). Essas magnitudes estão consistentes com faixas recomendadas em manuais e obtidas em estudos e retraanlaises para os materiais granulares usados (Yoder and Witczak, 1975, Huang, 2004).

Para as camadas reforçadas com geocélula, os módulos aumentaram significativamente: CSSg = 723 MPa (Série Bg) e GBMg = 656 MPa (Série Cg; média de 593 e 719 MPa nas Zonas 3 e 4).

3.3 Fator de melhoria do módulo (MIF)

O MIF quantifica a melhoria do módulo decorrente das geocélulas e permite inserir diretamente o módulo reforçado em análises mecanicistas (Er = MIF × Eun). A Tabela 4 resume os valores de MIF obtidos por retroanálise no trecho experimental e por um método analítico (Garcia and Avesani Neto 2021).

Tabela 4. Valores de MIF a partir dos ensaios de campo e previsão pelo método analítico.

Material de enchimento	MIF obtidos nos experimentos	MIF estimado pelo método analítico
CSS	2,6	2,9
GBM	2,8	3,2
GBM	3,3	3,2

Pela Tabela 4, observa-se que os valores de MIF variaram entre 2,6 e 3,3 nas zonas reforçadas. Para a CSSg (Zona 2), o MIF obtido no campo foi de 2,6, e p ara a GBMg, respectivamente para as Zonas 3 e 4, o MIF foi de 2,8 e 3,3. Considerando as variações de módulo não reforçado por zona, o MIF para CSSg ficou entre 2,3 e 2,7 (diferença absoluta máxima de 0,4 e relativa <10%). Para a GBM, a faixa estimada foi 2,7 a 3,5. Os resultados mostram uma tendencia de maior MIF para GBM do que para a CSS, coerente com o índice relativo de rigidez solo-reforço Si (Garcia and Avesani Neto 2021), ou seja, quanto menor o módulo do solo e maior a rigidez da parede da célula J, maior o MIF esperado.

A Tabela 4 também apresenta o valor de MIF estimado teoricamente utilizando a formulação analítica proposta por Garcia e Avesani Neto (2021). Para calcular o MIF pelo método analítico, foram adotados os parâmetros hiperbólicos do CSS e do GBM com base em ensaios in situ e de laboratório, bem como em recomendações da literatura (Duncan et al., 1980), como segue: $\gamma = 20$ kN/m³, $c' = 0$, $\varphi' = 45°$, Rf = 0,8, k = 900 para CSS e 600 para GBM, ku/k = 1,2 e n = 0,4. Os parâmetros e características da geocélula foram utilizados conforme apresentados na Tabela 1. A tensão induzida pelo processo de compactação foi estimada utilizando a metodologia proposta por Ehrlich e Mitchell (1994), considerando os procedimentos e equipamentos previamente citados.

Os valores de MIF obtidos pelo método analítico de Garcia and Avesani Neto(2021), de 2,9 para CSS e 3,2 para GBM, mostraram boa concordância com os experimentais, com diferenças absolutas de 0,1 a 0,4 e

relativas de 3 a 13%, corroborando a boa aplicabilidade do método para estimativas de projeto e análises preliminares, conforme visualizado na Figura 3.

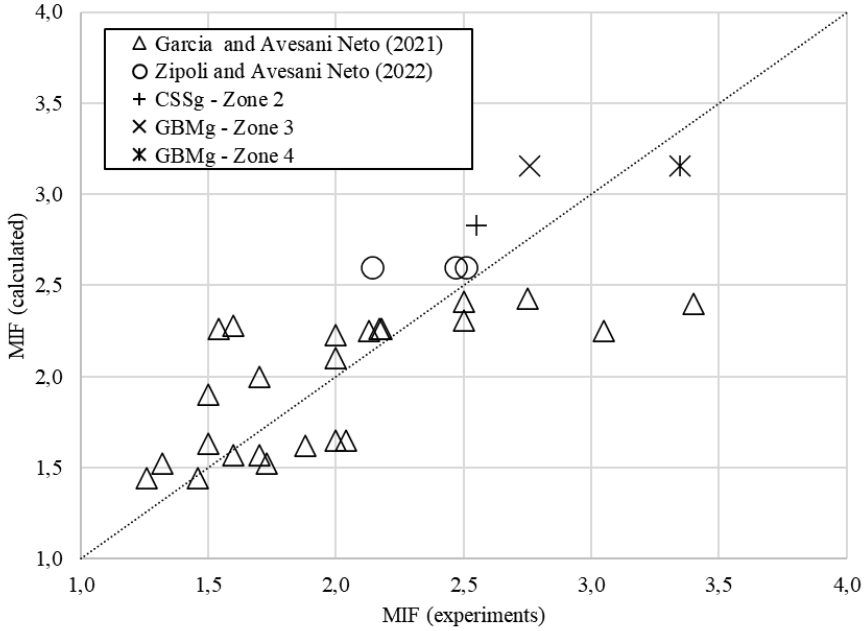


Figura 2. Comparação de valores de MIF estimados pelo método analítico com aqueles obtidos experimentalmente no campo - adaptado de Feng et al. (2024).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou retroanálises de um programa experimental em escala real com camadas sem reforço e reforçadas por geocélulas, submetidas a ensaios de viga Benkelman (BBT) durante a construção de uma rodovia. Empregaram-se como material granular macadame na camada de sub-base (CSS) e brita graduada simples (GBM) na base, sem e comreforços de geocélulas. Quatro zonas com 50 m foram construídas (uma de controle e três reforçadas). Ao todo, realizaram-se 219 BBT em três níveis (subleito, CSS/GBM sem reforço e CSSg/GBMg). As principais conclusões são:

- O uso de geocélulas reduziu significativamente o desvio-padrão das deflexões.
- O módulo de elasticidade de superfície (Esuf) aumentou consitentemente com o reforço.
- Os módulos de elasticidade das camadas (E) foram retroanalisados sendo obtidos valores coerentes como reportado naliteratura.
- Os valores de MIF obtidos dos experimentos foram de 2,6 para a CSS e 2,8 a 3,3 para a GBM.
- O método analítico para estimativa do MIF apresentou boa concordância com os resultados experimentais, indicando sua utilidade em projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avesani Neto, J. O. (2019). Application of the two-layer system theory to calculate the settlements and vertical stress propagation in soil reinforcement with geocell. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, n. 1, p. 32–41.

Avesani Neto, J. O.; Rodrigues, D. (2021). Instrumented load tests and layered elastic theory analysis of a large-scale EPS block embankment. *Transportation Geotechnics*, v. 26.

Biswas, S.; Hussain, M.; Singh, K. L. (2024). Behavior of bamboo and jute geocell overlaying soft subgrade under repeated wheel loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 2.

Duncan, J. M. et al. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*. California.

Ehrlich, M.; Mitchell, J. K. (1994). Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 120.

Feng, L. X.; Avesani Neto, J. O.; Zornberg, J. G. (2024). Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates: full-scale experimental sections on a highway. *Transportation Geotechnics*..

Feng, L. X. (2024). *Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates layers: full-scale experimental on a highway track*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Garcia, R. S.; Avesani Neto, J. O. (2021). Stress-dependent method for calculating the modulus improvement factor in geocell-reinforced soil layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, p. 146–158.

Ghazvinian, H.; Karami, H. (2023). Laboratory study of the effect of vegetation and gravel on runoff parameters under variable rainfall intensities. *Water Science & Technology*, v. 88, p. 2424.

Gottumukkala, B. et al. (2023). Laboratory and field evaluations of geocell reinforced bases for locally available material in the Himalayan region. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 9, n. 6.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. 2. ed. New Jersey: Pearson Education.

Krishnaraj, P. et al. (2023). Physical and numerical shaking table studies on geocell-reinforced retaining walls. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 9, n. 3, p. 62.

Levenberg, E. (2016). *ELLEA1: isotropic layered elasticity in Excel: pavement analysis tool for students and engineers*. Computer programme. Technical University of Denmark.

Luo, X. W. et al. (2023). *Study on performance of geocell-reinforced red clay subgrade*. Geosynthetics International, v. 31, n. 6, p. 968–980.

Minchala, D. et al. (2024). Laboratory evaluation of marginal and industrial waste material in geocell-reinforced pavements under cyclic loading. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 52, n. 1.

Pokharel, S. K. et al. (2017). Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 11, n. p. 2, p. 114-127.

Punetha, P.; Nimbalkar, S. (2022). Performance improvement of ballasted railway tracks using three-dimensional cellular geoinclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, p. 1061–1082.

Ruge, J. C.; Gomez, J. G.; Moreno, C. A. (2020). Analysis of the creep and the influence on the modulus improvement factor (MIF) in polyolefin geocells using the stepped isothermal method. *In: Geopolymers and Other Geosynthetics*. IntechOpen.

Saride, S. et al. (2022). Modulus improvement factor-based design coefficients for geogrid- and geocell-reinforced bases. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 148, n. 3.

Sawada, Y. et al. (2023). Lateral force–displacement relationships for shallowly buried pipe reinforced by geocells. *Geosynthetics International,* v. 31, n. 5, p. 638–651.

Yoder, E. J.; Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. London: Wiley.

Zipoli, L. L. R.; Avesani Neto, J. O. (2022). Evaluation of back-calculated elastic moduli of unreinforced and geocell-reinforced unbound granular material from full-scale field tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, n. 5, p. 910–921.

Zornberg, J. G. (2017). Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Transportation Geotechnics and Geoecology*, v. 189, p. 298–306.