

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DA RIGIDEZ DAS CAMADAS GRANULARES POR MEIO DE BENDER ELEMENTS

Continuous monitoring of the stiffness of granular layers using bender elements

Carolina Briceño^a, Manuel Parente^a, Mohammad Roshan^a, Miguel Azenha^a, António Gomes Correia^a, João Rocha^b, Marcos Martins^c, Joyce Chidassica^d, Ionut Moldovan^{d,f}, Helder Silva^e, José Neves^f, Erol Tutumluer^g

^a Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

^b CMEMS-UMinho, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

^c INESC TEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

^d Universidade Lusófona, Faculty of Engineering, Lisbon, Portugal

^e BUILT CoLAB – Collaborative Laboratory for the Future Built Environment, Porto, Portugal

^f CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

^g University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

RESUMO – Apesar da importância estrutural das camadas granulares não ligadas dos pavimentos flexíveis, a sua monitorização contínua enfrenta limitações técnicas significativas. Este estudo desenvolveu um sistema avançado de monitorização, baseado em sensores do tipo Bender Elements, para medir a rigidez dinâmica das camadas granulares. Foi concebido um sistema de proteção e acoplamento destinado a proteger os sensores contra tensões externas e a garantir um contacto adequado para a propagação da onda de corte no geomaterial. Um estudo numérico analisou a influência da geometria da cápsula, e foi integrado um sistema de amplificação personalizada para alcançar maiores distâncias. O sistema foi validado experimentalmente em laboratório e posteriormente implementado no terreno, onde se mantém em funcionamento.

ABSTRACT – Despite the structural importance of unbound granular layers in flexible pavements, their continuous monitoring faces significant technical limitations. This study developed an advanced monitoring system, based on Bender Elements sensors, to measure the dynamic stiffness of granular layers. A protection and coupling system was designed to shield the sensors from external stresses and ensure adequate contact for shear wave propagation in the geomaterial. A numerical study analyzed the influence of capsule geometry, and a custom amplification system was integrated to extend signal range. The system was experimentally validated in the laboratory and subsequently implemented in the field, where it remains in operation.

Palavras Chave – sensor bender element, monitorização geotécnica, rigidez dinâmica.

Keywords – bender element sensor, geotechnical monitoring, dynamic stiffness.

E-mails: id8649@alunos.uminho.pt (C. Briceño), map@civil.uminho.pt (M. Parente), jroshan2020@gmail.com (M. Roshan), miguel.azenha@civil.uminho.pt (M. Azenha), agc@civil.uminho.pt (A. Gomes Correia), joaorocha817@gmail.com (J. Rocha), marcos.martins@inesctec.pt (M. Martins), joycechida@gmail.com (J. Chidassica), dragos.moldovan@ulusofona.pt (I. Moldovan), helder.silva@builtcolab.pt (H. Silva), jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt (J. Neves), tutumlue@illinois.edu (E. Tutumluer)

ORCID: orcid.org/0000-0001-7761-4519 (C. Briceño), orcid.org/0000-0001-5765-2622 (M. Parente), orcid.org/0000-0002-5501-4747 (M. Roshan), orcid.org/0000-0003-1374-9427 (M. Azenha), orcid.org/0000-0002-0103-2579 (A. Gomes Correia), orcid.org/0000-0003-3085-0770 (I. Moldovan), orcid.org/0009-0001-9366-4855 (H. Silva), orcid.org/0000-0002-7131-7967 (J. Neves), orcid.org/0000-0003-3945-167X (E. Tutumluer)

1 – INTRODUÇÃO

As camadas granulares não ligadas que constituem a base e a sub-base dos pavimentos desempenham um papel fundamental na integridade estrutural das infraestruturas rodoviárias, uma vez que são responsáveis por distribuir eficazmente as cargas geradas pelo tráfego (Bzówka et al., 2021; Dushmantha et al., 2025; Erlingsson et al., 2017) e por proteger o subleito de tensões excessivas. O desempenho destas camadas depende de vários fatores, como a distribuição granulométrica, o teor de finos e a humidade, o histórico de cargas, a temperatura, entre outros (Lekarp et al., 2000), apresentando um comportamento mecânico altamente não linear, dependente do tempo e das cargas externas (Bzówka et al., 2021; Gkyrtis, 2023; Masad e Little, 2004). Esta complexidade, aliada à expansão contínua das redes rodoviárias, reforça a necessidade de soluções avançadas de monitorização geotécnica com maior precisão.

Existem vários métodos para caracterizar camadas granulares não ligadas (Correia, 1999), incluindo ensaios laboratoriais (AASHTO T 307-99, 2012) e ensaios não destrutivos *in situ*, como o Falling Weight Deflectometer (FWD) e o Light Weight Deflectometer (LWD). Contudo, estes métodos apresentam diversas limitações, nomeadamente a necessidade de amostras de elevada qualidade e não perturbadas, o conhecimento dos estados de tensão reais no terreno e a dependência de retroanálises realizadas com software não normalizado, o que pode afetar a variabilidade e a precisão dos resultados (Sangsefidi et al., 2021). Além disso, estas técnicas são aplicadas apenas em pontos específicos e num determinado instante.

Sensores do tipo Bender Element (BE) têm sido utilizados para calcular a rigidez dinâmica (módulo de corte) de materiais granulares, sobretudo no laboratório (Yoon et al., 2008; Byun e Tutumluer, 2017; Kang et al., 2021; Kang et al., 2022; Kang, 2023; Robinson et al., 2025; Zeng, 2006). Byun e Tutumluer (2017) aplicaram sensores BE em materiais granulares, demonstrando seu potencial para o estudo de camadas de granulometria variada em condições de campo. Posteriormente, Kang et al. (2021) desenvolveram sensores BE para avaliar a rigidez a longo prazo das camadas granulares não ligadas. Estes estudos evidenciam a eficácia dos sensores BE na determinação da rigidez dinâmica das camadas granulares dos pavimentos.

Por outro lado, embora as inspeções periódicas sejam necessárias para a gestão das redes rodoviárias modernas, a sua natureza esporádica limita a identificação precoce de deteriorações ou de potenciais problemas estruturais. Assim, torna-se útil a implementação de um sistema de monitorização contínua. Neste contexto, o projeto INTENT (2026), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (2023-2027), visa desenvolver um sistema eficaz de monitorização dinâmica de camadas granulares, baseado em sensores BE. Para tal, foi necessário superar vários desafios, incluindo proteger o frágil sensor piezoelétrico BE das tensões extremas durante a compactação do pavimento; assegurar um acoplamento ótimo entre os sensores BE e a camada granular não ligada; e permitir que o sensor emissor transmitisse energia suficiente ao geomaterial para detetar a onda propagada a longas distâncias. Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema para monitorizar continuamente a rigidez dinâmica de camadas granulares não ligadas utilizando sensores BE. O trabalho incluiu: (i) a conceção do sistema de proteção e acoplamento dos sensores, apoiada por análises numéricas para definir a geometria ideal da cápsula e pelo desenvolvimento de um sistema adicional destinado a melhorar a proteção e o acoplamento; (ii) o desenvolvimento e a implementação de amplificadores específicos para permitir a deteção de sinais a longas distâncias; (iii) a validação experimental do conjunto em laboratório; e (iv) o desenvolvimento final do sistema de monitorização para o seu funcionamento contínuo no campo, concluindo-se com o plano de instalação e a sua implementação.

2 – DESENHO DO SISTEMA DE BENDER ELEMENT

Os sensores BE são transdutores piezoelétricos concebidos para gerar e detetar ondas de corte que se propagam no solo entre um BE emissor e um BE recetor. Neste estudo, o emissor e o recetor

apresentam construção idêntica, composta por lâminas cerâmicas de PZT (zirconato-titanato de chumbo) coladas para formar uma estrutura em lâmina flexível. Os transdutores foram colocados num molde de PLA (ácido polilático) e encapsulados num composto de poliuretano, preservando simultaneamente o acoplamento acústico e permitindo o movimento fletor do elemento piezoelétrico (ver Figura 1). Quando excitados com um ciclo único de uma voltagem sinusoidal, os elementos PZT fletem lateralmente, induzindo deformação de corte no solo envolvente e gerando uma onda de corte.



Fig. 1 – Sensor Bender Element.

Por um lado, a inserção de sensores BE em camadas granulares de pavimentos coloca significativos desafios de engenharia. Por um lado, os sensores BE são muito frágeis e necessitam de proteção contra as cargas aplicadas pela compactação e pelo tráfego pesado. Por este motivo, decidiu-se embebê-los em cápsulas metálicas de proteção. As cápsulas são constituídas por peças em T de aço inoxidável, conforme ilustrado na Figura 2, com dimensões comercialmente disponíveis de 1 1/2" e 2". A posição do BE no interior da cápsula é apresentada na Figura 3, ilustrativamente, para o caso da cápsula de 1 1/2".

Por outro lado, a proteção oferecida pelas cápsulas diminui o contacto dos sensores BE com o geomaterial circundante, o que pode prejudicar a transmissão da onda de corte pelo mesmo e baixar a amplitude do sinal de saída. Assim, as exigências de proteção e de contacto são claramente antagónicas, sendo necessário quantificar estes efeitos de modo a conseguir uma solução equilibrada. Para conseguir isso, recorreu-se à modelação numérica, tendo sido simuladas as interações complexas entre as cargas induzidas pelo tráfego e as camadas granulares dos pavimentos, para responder a duas perguntas: (i) qual é a redução das tensões transmitidas ao sensor BE pelo tráfego da superfície por cada uma das duas cápsulas analisadas?, e (ii) qual é a redução da amplitude do sinal de saída face ao sinal de entrada para essas mesmas cápsulas?

Dois modelos distintos de elementos finitos são utilizados: uma análise quase estática é utilizada para avaliar a tensão aplicada pelo tráfego; e uma análise elastodinâmica para simular a propagação das ondas de corte entre o BE emissor e o BE recetor. Os dois módulos utilizados pertencem à plataforma computacional FreeHyTE (Moldovan et al., 2021, Climent et al., 2022). FreeHyTE é a primeira e, correntemente, a maior plataforma aberta a utilizar elementos finitos não convencionais (tipicamente híbridos-Trefftz, mas também híbridos e elementos de fronteira) para a modelação de problemas matemáticos, físicos e de engenharia. Ao contrário dos elementos convencionais, os elementos híbridos-Trefftz utilizam funções de aproximação que pertencem ao espaço das soluções exatas das equações diferenciais governativas (mas sem respeitar exatamente as condições de

fronteira). Essa estratégia introduz, assim, informação física na base de aproximação dos elementos finitos, talhada especificamente para o problema que se está a resolver. Isso faz com que os elementos finitos híbridos-Trefftz sejam insensíveis a comprimentos de onda muito pequenos, não requerendo refinamentos de malhas muito finos para modelar problemas caracterizados por grandes gradientes da solução, como é o caso dos problemas de transmissão de ondas de altas frequências produzidas pelos BE.

A definição dos modelos reproduz a configuração experimental instalada no laboratório e, posteriormente, no campo. Ambos os modelos correspondem a um sensor BE colocado a 20 cm de profundidade na camada granular de base, assente sobre uma camada de sub-base, também com 20 cm de espessura.

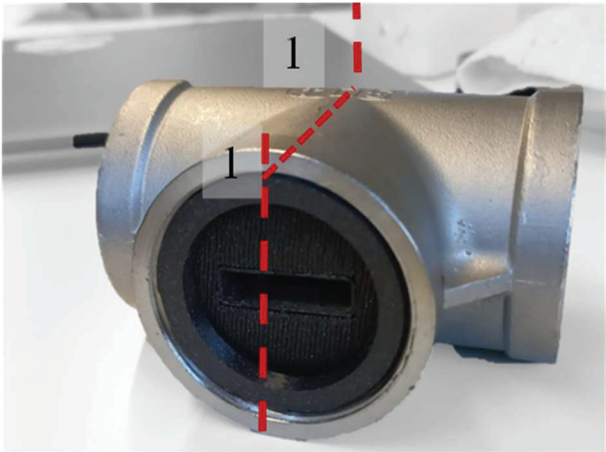


Fig. 2 – Peça em T utilizada no estudo.

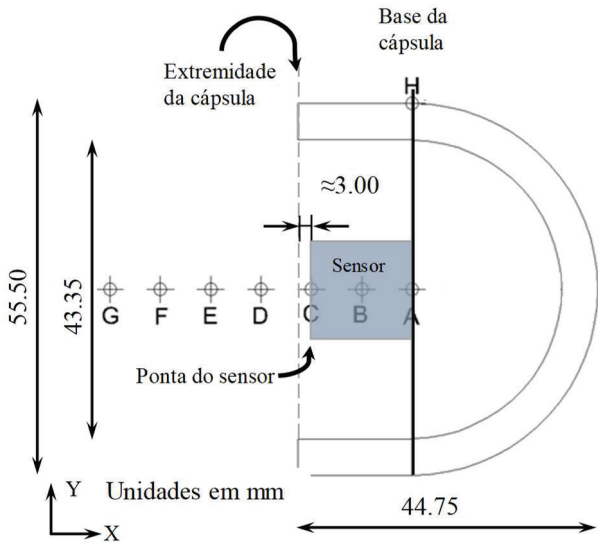


Fig. 3 – Secção 1-1 da cápsula de 1 1/2” com os pontos de medição (Briceño et al., 2026).

2.1 – Análise quase estática

Uma carga móvel percorre uma camada granular não ligada de 40 cm de espessura, contendo um sensor BE embebido a 20 cm de profundidade. O modelo numérico é apresentado na Figura 4 (unidades em metros). Uma carga distribuída de intensidade unitária é aplicada ao longo de 3 cm no topo da camada granular, deslocando-se gradualmente ao longo dos 100 cm da superfície livre. O comprimento de aplicação da carga é inferior ao comprimento típico de contacto de um rolo compactador, o que permite identificar a posição mais crítica na superfície da camada, que resultou entre 43 e 46 cm da extremidade esquerda do meio, conforme identificado na Figura 4. Nos limites laterais e inferior, os deslocamentos normais foram totalmente restringidos. O modelo é constituído por 1247 elementos finitos híbridos Trefftz, implementados na plataforma FreeHyTE.

O sensor é recuado 3 mm para o interior da cápsula metálica, garantindo proteção e acoplamento adequado com o meio granular (Figura 3). A distribuição de tensões verticais e horizontais é avaliada em pontos chave ao longo da cápsula (A, B e C), correspondentes à base, zona intermédia e extremidade do sensor BE, bem como na sua proximidade (pontos D, E, F e G).

A Figura 5 apresenta as intensidades das tensões verticais nos pontos de A a G, para as duas dimensões das cápsulas. As tensões são normalizadas em relação à carga vertical aplicada, pelo que os seus valores são expressos como uma percentagem da intensidade dessa carga vertical. Esta normalização permite compreender a variação das tensões nos pontos selecionados. Os resultados mostram que a tensão vertical aumenta do interior para o exterior da cápsula. Nos pontos A e B, as tensões são semelhantes em ambas as cápsulas, situando-se entre 0,3% e 0,4% da carga aplicada. No ponto C, porém, a tensão é duas vezes superior na cápsula maior do que na cápsula de menor diâmetro (1,15% vs 0,60%). Isto sugere que a cápsula de 1 1/2” oferece melhor proteção ao sensor BE contra tensões verticais do que a cápsula de 2”. A eficácia da cápsula na proteção do BE é comprovada pela grande diferença entre as tensões no último ponto interno (C) e no primeiro ponto externo (D), onde atinge cerca de 10% da carga aplicada.

2.2 – Análise elastodinâmica

No modelo elastodinâmico, a geometria e as propriedades mecânicas das cápsulas emissora e recetora, bem como dos materiais envolventes, são explicitamente incluídas. Em torno das cápsulas, e em todas as fronteiras exteriores do modelo, são aplicadas condições de fronteira absorventes para eliminar reflexões artificiais de ondas. O material não ligado é modelado como um meio poroso através da aplicação da teoria de Biot. As características do material granulares utilizado dentro da cápsula para garantir a proteção do BE (almofada de areia, solta e sem compactação) e fora da cápsula (camada granular não ligada) são listadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Caraterísticas mecânicas dos materiais granulares (teoria de Biot).

Caraterística	Almofada de areia	Camada granular não ligada
Módulo de Young (MPa)	3	50
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3
Módulo de Biot (kPa)	2,37	583,81
Densidade da mistura (kg/m³)	1509	2070
Fração volúmica	0,173	0,408
Condutividade hidráulica (m/s)	6,51E-5	7,07E-7

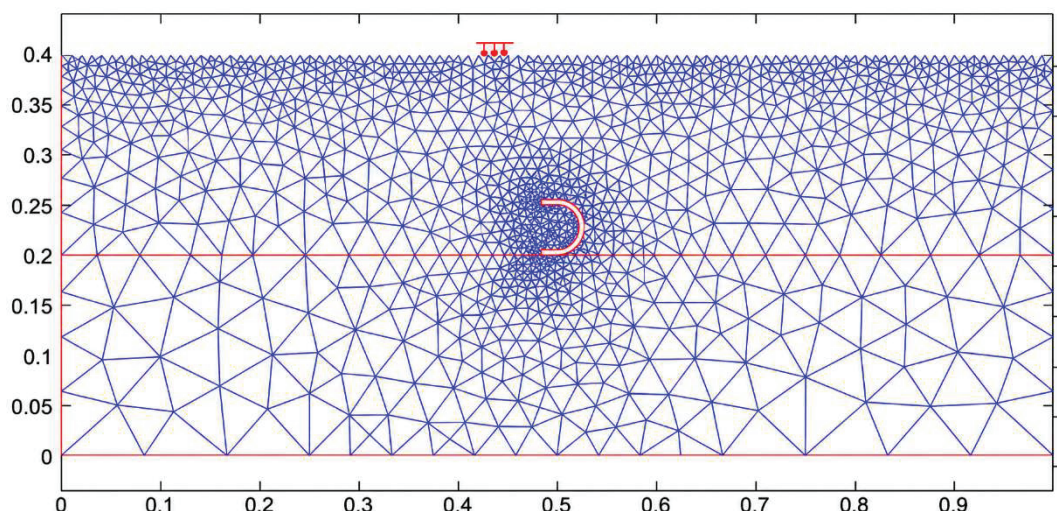


Fig. 4 – Modelo de elementos finitos do ensaio quase-estático (Briceño et al., 2026).

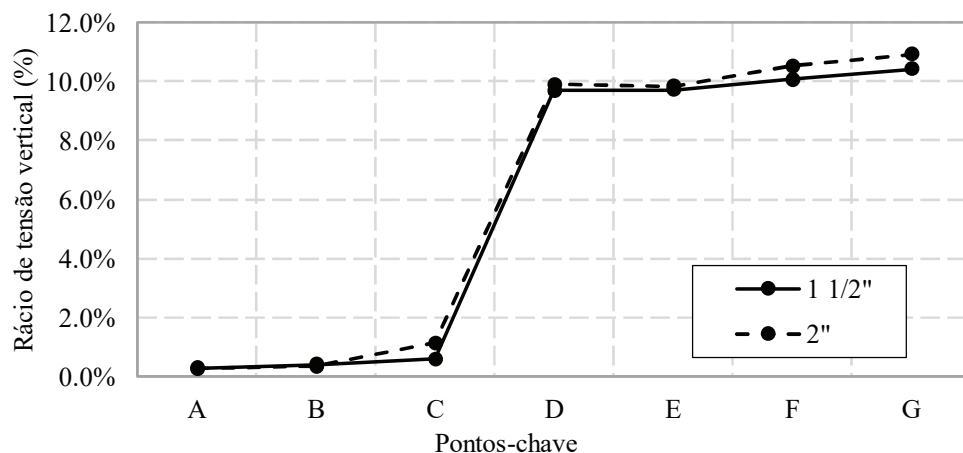


Fig. 5 – Percentagem de pressão vertical nos pontos seleccionados (Briceño et al., 2026).

Foi considerada uma distância de 500 mm entre as extremidades do emissor e do recetor. O modelo, ilustrado na Figura 6 (unidades em metros), é constituído por 3207 elementos finitos híbridos-Trefftz, implementados na mesma plataforma FreeHyTE utilizada no modelo quase-estático. O BE emissor é modelado explicitamente no interior da cápsula direita através da imposição de um deslocamento lateral em forma de um único pulso sinussoidal com frequência de 800 Hz. O BE recetor não é modelado explicitamente de modo a evitar as dificuldades associadas com a modelação fisicamente consistente da interação entre o meio poroso modelado pela teoria de Biot e o material piezoelétrico do BE recetor. Com efeito, a considerável diferença de impedância e características mecânicas dos dois materiais e a não-linearidade das respetivas condições de contacto que é particularmente difícil de quantificar matematicamente (o meio granular não adere à superfície do BE), iriam incutir grandes incertezas nos resultados do modelo sem trazer nenhum benefício considerável, já que o objetivo da modelação é obter o padrão da propagação da onda de corte até à sua chegada à ponta do BE recetor. Assim, o modelo regista a amplitude dos deslocamentos laterais associados à onda de corte ao longo dos 500 mm de propagação, desde o exterior imediato da cápsula emissora (4 cm da ponta do emissor) até à extremidade do recetor (50 cm da ponta do emissor).

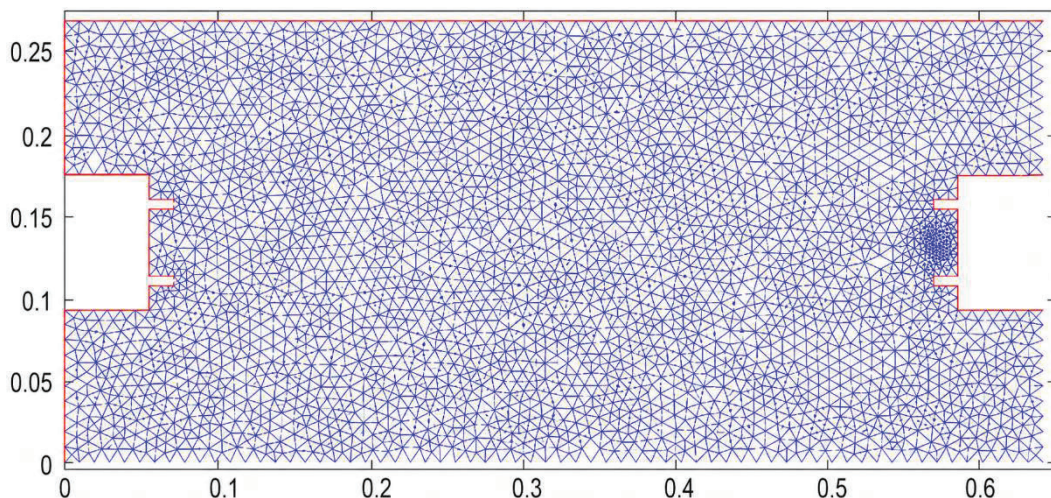


Fig. 6 – Modelo de elementos finitos do ensaio dinâmico (Briceño et al., 2026).

A Figura 7 apresenta o rácio de deslocamento lateral (definido como o rácio entre a amplitude do deslocamento lateral no ponto de medição e a amplitude do deslocamento lateral na extremidade do transmissor) em sete pontos ao longo do comprimento de propagação, para os dois tamanhos de cápsula. O rácio no emissor é, naturalmente, 100% e não é representado para melhorar a legibilidade do gráfico.

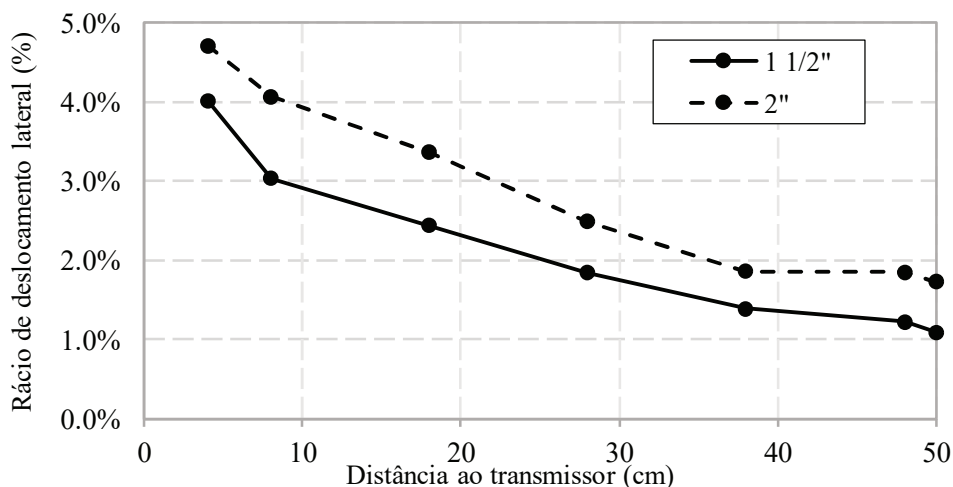


Fig. 7 – Atenuação do sinal ao longo da distância (Briceño et al., 2026).

Para ambas as cápsulas, a análise dinâmica revela que a amplitude da onda de corte diminui drasticamente já na proximidade do emissor. De facto, em ambos os casos, mais de 95% da intensidade do sinal é perdida nos primeiros 5 cm após a extremidade do emissor. Esta perda resulta dos efeitos combinados do amortecimento da onda causado pela presença da cápsula rígida e do material de proteção (areia fina) que preenche a cápsula do emissor. A atenuação é maior na cápsula de 1 1/2", devido às suas paredes mais estreitas, que aumentam o nível de confinamento da onda.

Observa-se uma atenuação moderada durante a propagação da onda de corte ao longo de 50 cm no material granular não ligado. Como esperado, nesta região a atenuação é independente da dimensão da cápsula, situando-se em cerca de 3% da intensidade do sinal em ambos os casos. Consequentemente, o sinal de deslocamento no recetor corresponde apenas a 1,1% do deslocamento inicial para a cápsula de 1 1/2" e 1,7% para a cápsula de 2". Este resultado indica claramente a necessidade de utilizar amplificadores nos BE emissores e recetores.

Do ponto de vista prático, conclui-se que a cápsula de 1 1/2" é mais segura para uso em campo, uma vez que protege significativamente melhor os sensores BE. De facto, a cápsula mais pequena reduz as tensões aplicadas durante a compactação na extremidade do sensor BE para metade, em comparação com a cápsula maior. Em ambas as cápsulas, ocorre uma atenuação muito elevada das ondas na zona próxima do emissor, pelo que é necessária amplificação elétrica do sinal.

No que respeita ao sistema de amplificação necessário para completar a configuração experimental com sensores BE, foram concebidos dois amplificadores eletrónicos personalizados: um amplificador de potência para excitar o BE transmissor com sinais de alta tensão e um amplificador de instrumentação para condicionar o sinal recebido pelo BE recetor. O amplificador de potência baseia-se num amplificador operacional PA96CE, configurado com um ganho de $G=10$ e alimentado por duas fontes simétricas de até ± 80 V. Este fornece um sinal sinusoidal de elevada qualidade ao BE emissor, permitindo uma potência máxima de saída de 80 W.

O amplificador de instrumentação é constituído por dois amplificadores operacionais LF356N em série, alimentados por fontes reguladas galvanicamente isoladas de ± 5 V. O piezoelétrico liga-se diretamente ao terminal positivo do amplificador da primeira etapa, garantindo elevada impedância de entrada e perdas mínimas de sinal. Esta etapa fornece um ganho de $G=100$ e inclui um filtro passa-baixo com frequência de corte de 530 Hz para eliminar o ruído DC. A segunda etapa oferece um ganho selecionável de $G=10$ ou $G=100$ através de um elemento de seleção por ponte e aplica um filtro passa-banda com frequências de corte $f_{\text{low}}=530$ Hz e $f_{\text{high}}=1200$ Hz. No total, o amplificador de instrumentação atinge um ganho global entre $G=1000$ e $G=10000$.

3 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

De acordo com os resultados fornecidos pelos modelos numéricos, os sensores BE foram colocados no interior de tubos em T de aço inoxidável com 1 1/2" de diâmetro, utilizando suportes plásticos impressos em 3D, especialmente concebidos para serem aparafusados às roscas dos tubos. Cada sensor foi colocado no interior do suporte, com a sua extremidade recuada aproximadamente 3 mm em relação ao bordo da cápsula de proteção, deixando cerca de 18 mm do BE livre no interior do suporte, enquanto os ~2 mm restantes protruíam do suporte, em contacto com o material de interface (Figura 8a).

Adicionalmente, para reforçar a proteção do sensor e garantir um acoplamento ótimo entre a extremidade do sensor e o solo, foi proposto um sistema adicional na extremidade do conjunto tubo-suporte-sensor. Este sistema consistiu em duas malhas de nylon e uma camada intermédia de areia normalizada EN 196-1 (CEN, 2016) com dimensões entre 1 e 2 mm. A primeira malha de nylon possui uma abertura que permite que a extremidade do sensor esteja em contacto direto com o material de interface, impedindo, simultaneamente, a entrada de areia no suporte (Figura 8b). A segunda malha foi utilizada para estabilizar o material de interface, consolidando-o como uma unidade (Figura 8c).

Após a preparação do sistema de proteção, ambos os sensores (emissor e recetor) foram colocados no interior de uma caixa metálica de $80 \times 40 \times 30$ cm³, com o centro de cada sensor localizado a 10 cm da base. Os tubos em T contendo os sensores protegidos foram fixados a varões verticais de aço inoxidável, e o material granular não ligado (UGM), recolhido no local onde os sensores serão instalados em campo, foi colocado e compactado em três camadas, resultando numa espessura total de 20 cm. A distribuição granulométrica do UGM é apresentada na Figura 9.

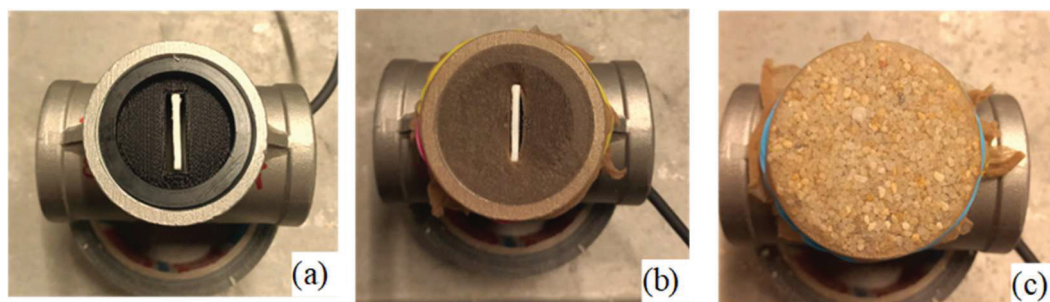


Fig. 8 – Detalhe do sistema de proteção dos sensores BE constituído por (a) sensor no suporte e tubo de aço inoxidável, seguido de (b) primeira malha de nylon, e (c) material de interface e malha exterior de nylon (Briceño et al., 2026).

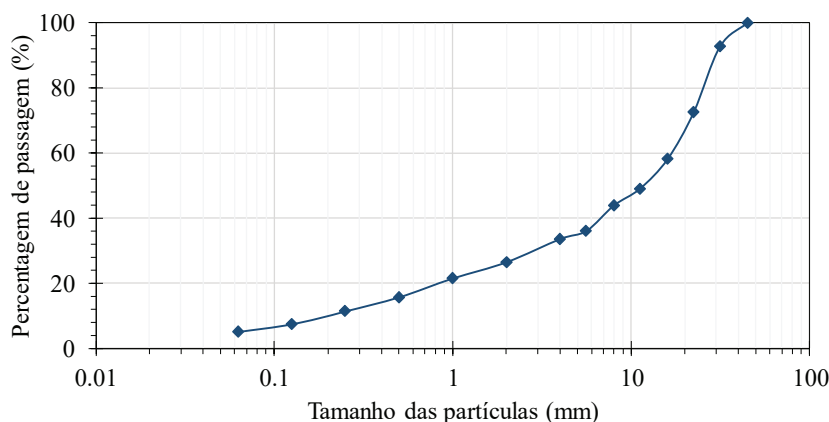


Fig. 9 – Atenuação do sinal ao longo da distância (Briceño et al., 2026).

A Figura 10 apresenta uma visão geral da configuração considerada para a validação experimental. Utilizou-se um gerador de funções de 25 MHz (TG2511 LX1) para gerar o sinal de excitação do sensor emissor. Inicialmente, considerou-se a utilização apenas do amplificador de potência ligado ao sensor emissor. O gerador de funções foi ligado ao amplificador de potência, alimentado por duas fontes de 60 V, com o objetivo de fornecer energia suficiente para gerar uma onda de corte detetável no meio granular. Tendo em conta as características do amplificador, a amplitude do gerador foi definida em 5,4 Vpp, com um intervalo de 50 ms entre as ondas.

Em relação à gama de frequências para este meio, foi avaliada a banda de 500-1000 Hz. Constatou-se que as amplitudes máximas detetadas eram maiores quando se considerava uma frequência de 800 Hz, sendo as amplitudes nesta frequência 116,67 % e 17,87 % superiores às amplitudes quando se consideravam 500 Hz e 1000 Hz, respetivamente. Assim, considerou-se uma frequência de 800 Hz para a onda emitida, mantendo-a constante ao longo do ensaio. No entanto, a interface do sistema de monitorização descrito na Secção 4 permite reajustar remotamente a frequência da onda emitida, pelo que serão realizados testes periódicos de otimização tendo em conta as alterações da rigidez da camada granular provocadas que a campanha experimental pretende monitorizar.

Cada ensaio é realizado com o objetivo de que a onda de corte emitida pelo sensor emissor seja registada com nitidez pelo sensor recetor, considerando uma distância D entre os sensores (Figura 11a). Isto permite estimar o tempo entre o primeiro pico do sinal emitido e o primeiro pico do sinal recebido, geralmente associado ao pico máximo, definido como tempo de chegada (Δt)

(Figura 11b). Apesar de se basear muito na experiência do utilizador na interpretação de sinais, este procedimento é um dos dois recomendados no regulamento americano para testes envolvendo bender elements (ASTM D8295-19; ASTM 2019). A partir deste valor, a velocidade de propagação da onda de corte no geomaterial (V_s) é obtida dividindo a distância percorrida D por Δt . Com a V_s , é possível estimar o módulo de corte máximo, o rigidez (G_{max}) a partir do produto entre a densidade aparente do material e o quadrado dessa velocidade V_s . Assim, o estudo no laboratório procura determinar a distância máxima D à qual a onda de corte pode ser identificada com fiabilidade. Este processo de identificação do sinal recebido foi realizado manualmente, com base no indicado em Byun e Tutumluer (2017), Kang et al. (2021) e Wang et al. (2025).

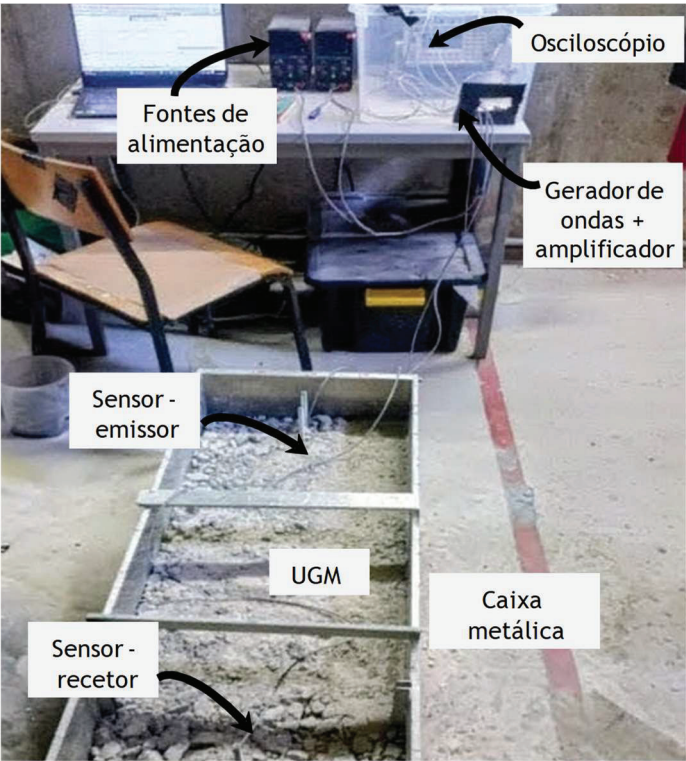


Fig. 10 – Configuração experimental para validação em laboratório (Briceño et al., 2026).

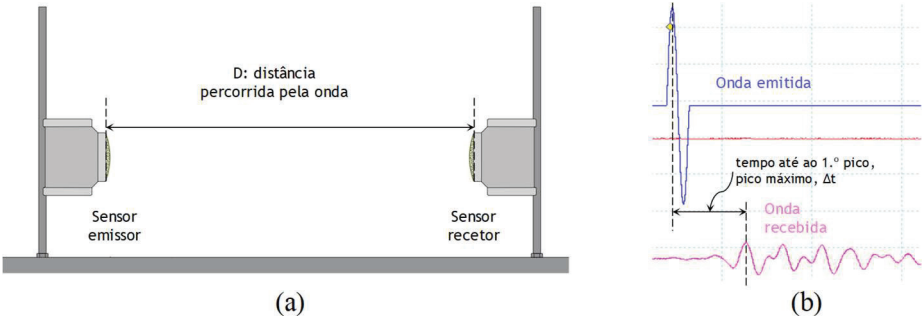


Fig. 11 – Variáveis para a determinação da velocidade da onda de corte (V_s): (a) Distância (D) entre os sensores, percorrida pela onda de corte, e (b) tempo de chegada (Δt).

O teste foi realizado sem aplicar cargas ao meio, utilizando diferentes valores de distância entre sensores para determinar a distância D ideal para as condições de campo. Figura 12 apresenta os resultados em termos de amplitude máxima da primeira onda detetada e distância entre sensores de 20, 51, 65,5, 76 e 97 cm. À medida que a distância aumentava, a amplitude máxima detetada diminuía de forma não linear. Ao comparar os valores obtidos a 20 cm com os obtidos a distâncias maiores, observaram-se diminuições de 80,67% (51 cm), 83,31% (65,5 cm) e 92,24% (76 cm). Verificou-se que não foi possível detetar ondas a uma distância de 97 cm, tornando 76 cm a última distância entre sensores viável.

Além disso, avaliou-se o impacto da utilização de uma tensão mais elevada (80 V) para alimentar o amplificador de potência, o que implicou um aumento da amplitude da onda para 7,4 Vpp no gerador de ondas, mantendo a frequência e o intervalo entre as ondas. Foi detetada uma amplitude máxima de 28,82 microvolts, indicando um aumento de 35,37% em comparação com o valor obtido anteriormente com uma potência de 60 V. Cabe mencionar que, para esta distância de 76 cm entre os sensores, o tempo de chegada (Δt) foi de 8,44 ms, medido com um osciloscópio digital PicoScope 4424.

Posteriormente, para melhorar a receção do sinal, incorporou-se o amplificador de instrumentação, aumentando significativamente o sinal e atingindo uma amplitude associada ao primeiro pico de 134,33 mV para 76 cm de distância entre sensores, com um Δt de 8,40 ms (ver Figura 13). Se bem que, geralmente, o pico máximo esteja associado ao primeiro pico, neste caso ocorreu o segundo pico, correspondendo a uma amplitude de 151,70 mV.

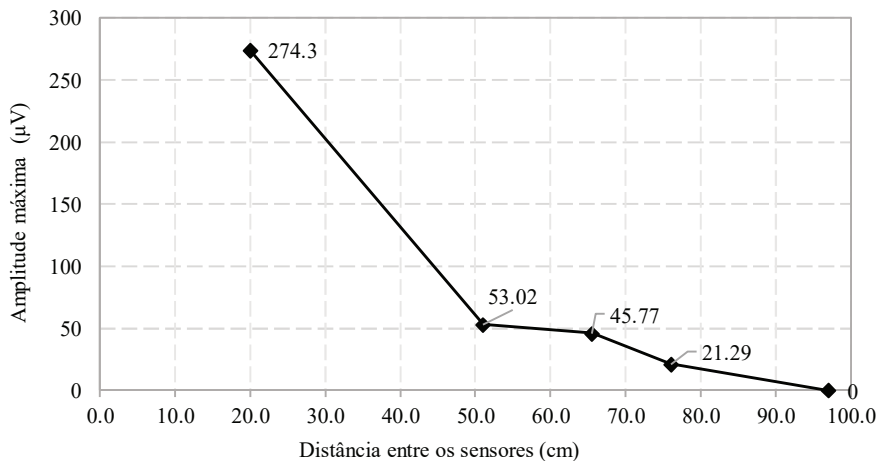


Fig. 12 – Distância D em relação à amplitude máxima (associado ao pico máximo), considerando apenas a amplificação no sensor emissor.

4 – SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O sistema de monitorização para a instalação em campo foi concebido para realizar a aquisição autónoma e contínua de dados multisensoriais, destinados à avaliação do comportamento mecânico e do estado estrutural das camadas granulares não ligadas dos pavimentos. Integra uma aplicação central com um conjunto de componentes físicos responsáveis pela geração de sinal, aquisição e monitorização ambiental, otimizados para operação em campo. O sistema suporta modos de aquisição imediata e agendada, incluindo filtragem de sinal, orquestração de dispositivos e mecanismos redundantes de armazenamento de dados. Um diagrama esquemático do sistema de monitorização é apresentado na Figura 14.

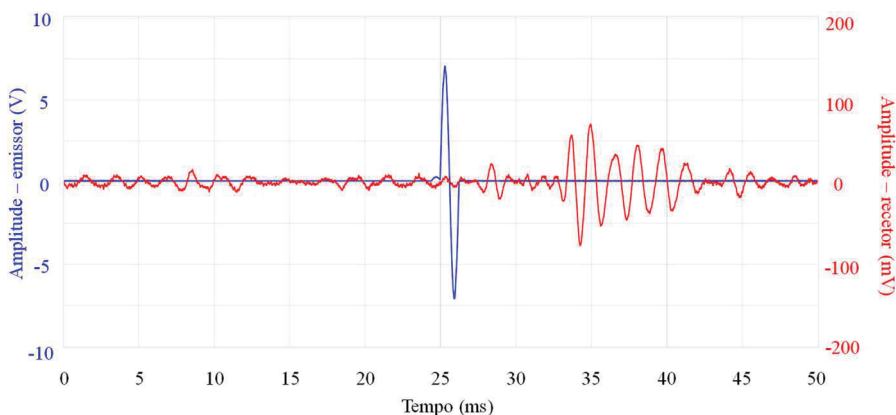


Fig. 13 – Resultados experimentais com 76 cm entre sensores BE, com ambos os amplificadores: ondas emitida (azul) e recebida (vermelho) (Briceño et al., 2026)

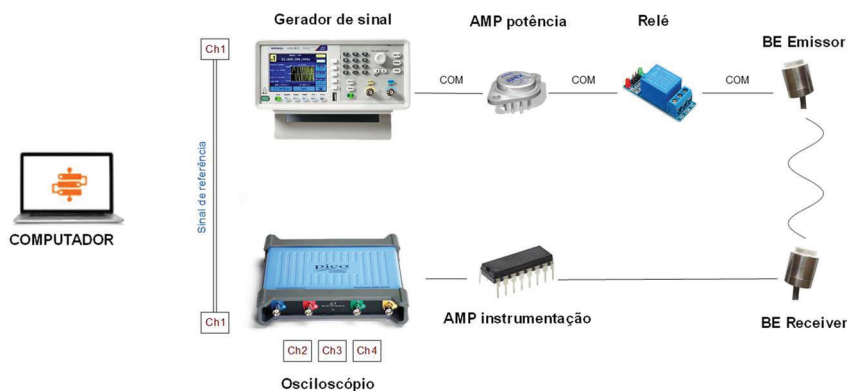


Fig. 14 – Visão geral do sistema de monitorização adaptada (Briceño et al.2026).

A arquitetura central de hardware inclui um computador portátil (orquestrador) que executa o software de aquisição, um gerador de sinais Tektronix AFG1022 para gerar os sinais de excitação e um osciloscópio digital PicoScope 4424A para captar as formas de onda correspondentes. Um microcontrolador Arduino Nano ESP32 controla uma placa de relés de 16 canais, responsável pela comutação entre os sensores BE. A sonda SoilVue10 é utilizada para medições de humidade e temperatura do solo a várias profundidades, comunicando-se através de um datalogger CR350. Além disso, o sistema integra tomadas inteligentes Tapo P100 para controlo remoto do amplificador. Todos os instrumentos se ligam ao computador principal via USB, por meio de um hub alimentado, exceto a tomada inteligente, com a qual se comunica via Wi-Fi.

O componente de software, desenvolvido em Python, inclui uma interface gráfica modular (Tkinter), controladores de dispositivos (para gerador, osciloscópio, Arduino, datalogger e tomada inteligente), um sistema de configuração baseado em JSON e um agendador robusto (APScheduler). Uma interface gráfica permite o controlo em tempo real e a monitorização dos parâmetros de aquisição e do estado dos dispositivos. A aquisição de sinal é estruturada em ciclos e armazenada numa base de dados PostgreSQL (local e remotamente), incluindo metadados como carimbos temporais, condições ambientais e estado da filtragem. A filtragem é implementada com filtros Butterworth de quarta ordem e fase zero, com frequências de corte passa-baixo e passa-alto

configuráveis, aplicados ao sinal médio do recetor. O armazenamento dos dados adquiridos segue uma estratégia de redundância em três níveis independentes, concebida para garantir a integridade da informação em condições de operação em campo com conectividade intermitente. Cada aquisição é gravada localmente em ficheiro, sob a forma de um CSV contendo as amostras do sinal médio e os respetivos metadados, acompanhado de uma representação gráfica da forma de onda que permite a inspeção visual imediata sem necessidade de acesso à base de dados. Em paralelo, os mesmos dados são persistidos nas duas instâncias PostgreSQL referidas — local e remota, esta última acessível via VPN —, com escrita síncrona na instância local e replicação assíncrona para a instância remota através de um mecanismo baseado em filas. Quando a ligação VPN se encontra indisponível, as operações pendentes são preservadas em ficheiro de recuperação e processadas automaticamente após o restabelecimento da ligação, assegurando que nenhum dado é perdido durante períodos de operação não assistida.

A arquitetura do sistema enfatiza a tolerância a falhas e a automação, deteta e reconecta dispositivos desligados, verifica a integridade dos dados e regista todas as operações para rastreabilidade. A alimentação do amplificador é gerida automaticamente através da tomada inteligente, garantindo ativação apenas durante os ciclos de aquisição, com timeouts de segurança incorporados. Os dados do SoilVue10 são recolhidos de hora a hora através de automação da interface do software PC400 e armazenados numa base de dados dedicada.

Assim, o sistema foi concebido para um funcionamento prolongado em campo, combinando flexibilidade, modularidade e escalabilidade. Permite a aquisição fiável de dados de propagação de ondas, condições do solo e movimento inercial, apoiando a avaliação contínua da integridade estrutural das infraestruturas rodoviárias com sensores BE embebidos.

5 – DETALHES DA INSTALAÇÃO DE CAMPO

Após a validação do desenho do sistema com sensores Bender Element e o desenvolvimento do sistema de monitorização, procedeu-se à sua implementação no terreno, na pedreira da Mota-Engil em Penafiel, Portugal. O plano de instalação da instrumentação decorreu ao longo de quatro dias numa secção em serviço, conforme ilustrado na Figura 15. A localização dos pares de sensores foi definida de forma que um deles funcionasse como par de controlo, instalado na zona entre os rastros dos pneus, enquanto os outros dois pares (posição vertical e horizontal) foram colocados diretamente na zona afetada pelo tráfego, com o objetivo de verificar a consistência entre as medições.

No primeiro dia, procedeu-se à preparação da fundação. O material existente foi escarificado, fragmentando e soltando a camada superficial do solo natural, com o objetivo de eliminar heterogeneidades e facilitar uma compactação eficaz. Posteriormente, o solo foi recomposto numa camada de 30 cm, alcançando a densidade necessária para servir de base estável para a instrumentação, sobre a qual seria construída a sub-base. Além disso, a inclinação da superfície foi ajustada para promover a drenagem, e um geotêxtil foi colocado entre a fundação recomposta e a futura sub-base para separar os materiais e impedir a migração de finos.

No segundo dia, procedeu-se à instalação dos dispositivos de medição e à construção das camadas estruturais. A partir do nível superior do terreno, foram instalados tubos e extensões de cabos, que serão posteriormente ligados aos sensores BE. Foram também instalados extensómetros, células de pressão e placas de radar de penetração no solo, ampliando a capacidade de monitorização da secção. Simultaneamente, foram realizados ensaios de compactação utilizando equipamento Troxler para verificar a densidade e o teor de humidade e confirmar que a fundação cumpria as especificações. Em seguida, foram preenchidos 20 cm de sub-base, na qual foram colocados discos metálicos como suportes para as cápsulas com sensores BE, cujas localizações são mostradas na Figura 15. Foram também realizados levantamentos topográficos e ensaios de carga para medir elevações e inclinações, registar as localizações dos discos metálicos e avaliar a rigidez da superfície, respetivamente. Além disso, foram instalados sensores de temperatura e humidade para correlacionar o comportamento do pavimento com as condições ambientais.

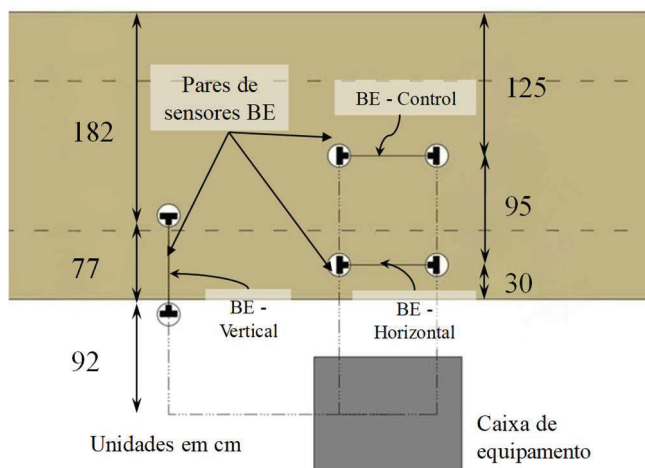


Fig. 15 – Localização e instalação dos sensores no terreno.

Posteriormente, os 20 cm seguintes, correspondentes à base, foram preenchidos e compactados com maquinaria. Foram repetidos os controlos de qualidade nesta camada, incluindo ensaios de compactação e de carga, bem como levantamentos topográficos. Procederam-se à instalação de extensómetros e de placas de radar de penetração no solo nas novas camadas, bem como à realização de ensaios de Proctor modificado para determinar o teor de humidade ótimo e a densidade máxima do material. Posteriormente, foi realizada uma escavação cuidadosa nos locais dos discos, situados na sub-base, a fim de soldar as cápsulas (com os sensores BE) às placas metálicas e ligá-las às extensões dos cabos. Após verificar a sua fixação, os sensores foram totalmente cobertos e foi realizada uma compactação controlada.

No terceiro dia, foi instalada a caixa de equipamento, que concentrou as ligações e protegeu o sistema de aquisição de dados de eventos como chuva e ondas de calor. Assim, os sensores foram ligados às caixas de controlo no interior da caixa e as ligações secundárias foram concluídas, garantindo a transmissão de dados. Foram realizados testes adicionais com radar de penetração no solo para avaliar a homogeneidade da secção.

Por fim, o quarto dia centrou-se na verificação final e no encerramento do sistema, tendo sido fechadas as ligações e as caixas secundárias, consolidando assim a rede de instrumentação. Além disso, foram realizados testes finais ao equipamento e aos sensores, confirmando que tudo estava operacional e pronto para registar o comportamento do pavimento em condições reais de tráfego.

Os resultados preliminares, conforme ilustrado em Figura 16, comprova o seu bom desempenho em aplicações práticas no controlo e monitorização do estado estrutural de camadas granulares não ligadas. Para a interpretação dos sinais obtidos no campo, é utilizada a mesma técnica de interpretação recomendada pelo regulamento ASTM D8295-19 (ASTM, 2019) e descrita na Figura 11b.

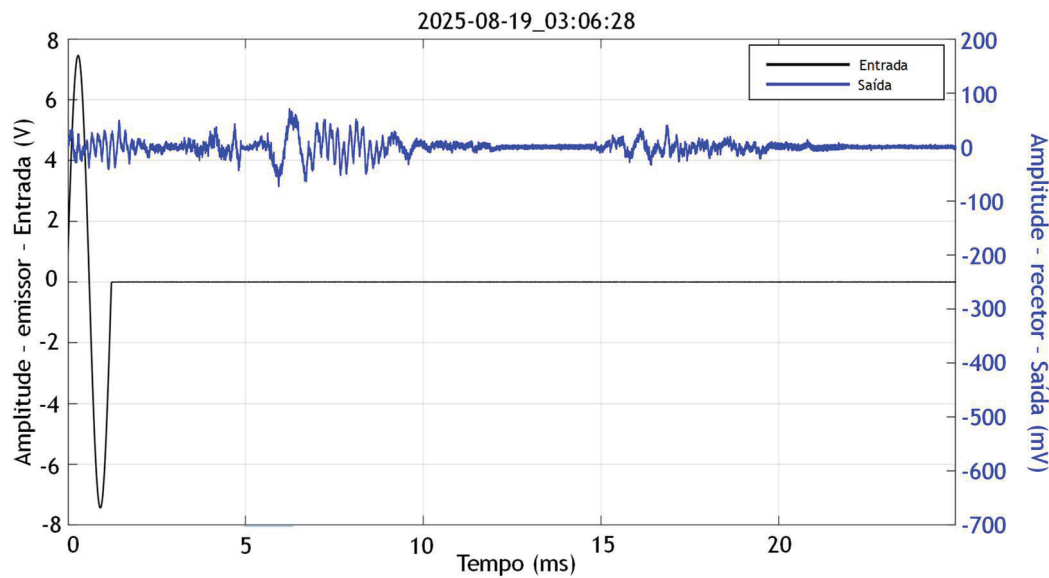


Fig. 16 – Exemplo de resultados de terreno: ondas emitidas (preto) e ondas recebidas (azul).

Nesta mesma secção experimental, foram também instalados sensores convencionais e realizados ensaios complementares de controlo da qualidade dos materiais, com o objetivo de validar os resultados medidos pelos BE. Foram instalados extensómetros de resistência elétrica e células de tensão total para análise dos estados de tensão e deformação instalados na estrutura do pavimento em condições controladas de carregamento (passagem quase estática de camiões com carga conhecida nos eixos). Em simultâneo, foi instalado um sensor para medição da humidade e temperatura a vários níveis de profundidade, baseada na tecnologia TDR (Refletometria no Domínio do Tempo). De forma complementar, nas camadas granulares do pavimento e no solo da fundação foram realizados ensaios de controlo da baridade e do teor em água (metodologia nuclear), ensaios de carga com defletómetro de impacto ligeiro, para conhecimento do módulo de deformabilidade, e ensaios de radar de prospeção com o objetivo de avaliação das deformações permanentes ao longo do tempo (Neves et al., 2026).

6 – CONCLUSÕES

Este artigo apresenta a conceção, a calibração e a validação experimental de um sistema de medição e monitorização para a avaliação dinâmica de camadas granulares não ligadas, utilizando sensores BE. O desenvolvimento do sistema incluiu a construção dos sensores BE, sistemas de proteção mecânica escolhidos através de simulação numérica, sistemas de amplificação de sinal e um sistema de monitorização. Assim, foi proposto um sistema de proteção que garante a integridade do sensor (embora reduza a amplitude do sinal de saída); foi garantido um acoplamento eficiente entre a extremidade do sensor e o meio granular através da utilização de um material de interface; e foram construídos amplificadores de potência e de instrumentação que permitem ao sensor BE induzir energia suficiente no geomaterial para detetar a onda propagada.

No final da validação experimental, observou-se que, para a configuração proposta, considerando uma distância de 76 cm entre sensores, uma frequência de excitação de 800 Hz e a utilização de um amplificador para o sensor emissor alimentado por uma fonte de 80 V, foi possível detetar claramente a onda de corte. Além disso, a implementação do amplificador de instrumentação melhorou significativamente a capacidade de receção, obtendo-se uma amplitude de sinal até 5000 vezes superior à obtida com apenas um amplificador.

Com base nestes resultados, o sistema demonstrou a robustez necessária para ser transferido para o campo. Assim, três pares de sensores BE protegidos e um sistema de monitorização contínua foram instalados em pontos seleccionados de um trecho experimental, estando a monitorização em curso e os resultados a ser armazenados para análise posterior. Além disso, foram também instalados sensores convencionais e realizados ensaios complementares de controlo da qualidade dos materiais, com o objetivo de validar os resultados medidos pelos BE. A instalação em condições reais permitiu avaliar o desempenho do sistema face a cargas externas e condições ambientais.

Esta fase final valida o seu desempenho como ferramenta de monitorização contínua da rigidez dinâmica, verificando se cumpre adequadamente as exigências práticas de controlo e monitorização da condição estrutural de camadas de UGM. Em relação à sua aplicabilidade na engenharia, a identificação do intervalo de tempo entre o sinal emitido e o recebido permite determinar a rigidez da camada e caracterizar a sua evolução, proporcionando informações úteis para antecipar processos de deterioração e planear intervenções de manutenção de forma mais eficiente.

7 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT/MCTES no âmbito do projeto “INTENT” com a referência 2022.06879.PTDC, através de fundos nacionais (PIDDAC), no âmbito da Unidade de I&D Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), referência UIDB/04029/2025, do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, referência LA/P/0112/2020, e da Unidade de I&D Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS), referência UIDB/04625/2025. O financiamento foi igualmente assegurado pela FCT a través da bolsa de doutoramento 2023.03777.BD atribuída ao terceiro autor.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T307-99 (2012). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials – SHRP Protocol P46. Washington DC.
- ASTM D8295-19 (2019). Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements. <https://doi.org/10.1520/D8295-19>
- Briceño, C.; Parente, M.; Roshan, M.; Azenha, M.; Correia, A. G.; Rocha, J.; Martins, M.; Chidassuca, J.; Moldovan, I.; Silva, H.; Tutumluer, E. (2026). Continuous stiffness monitoring of granular layers of pavements by bender elements. Proceedings of 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vienna, Austria (Unpublished conference paper).
- Byun, Y.-H.; Tutumluer, E. (2017). Bender elements successfully quantified stiffness enhancement provided by geogrid–aggregate interlock. Transportation Research Record, 2656 (1), pp. 31-39. <https://doi.org/10.3141/2656-04>
- Bzówka, J.; Grygierek, M.; Rokitoski, P. (2021). Experimental investigation using distributed optical fiber sensor measurements in unbound granular layers. Engineering Structures, 231, 111767 p. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111767>

- Climint, N.; Moldovan, I.; Correia, A. G. (2022). FreeHyTE: A Hybrid-Trefftz Finite Element Platform for Poroelastodynamic Problems. In *Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering*, 164 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77230-7_7
- Correia, A. G. (1999). Unbound Granular Materials: laboratory testing, in-situ testing and modelling. In *Proceedings of an International Workshop on Modelling and Advanced Testing for unbound granular materials*, Lisbon, pp. 3-15.
- Dushmantha, A.; Jayakody, S.; Gui, Y.; Gallage, C. (2025). A comprehensive review of the resilient behaviour of unbound granular pavement materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 12 (3), pp. 522–550. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.06.004>
- Erlingsson, S.; Rahman, S.; Salour, F. (2017). Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi stage RLT testing. *Transportation Geotechnics*, 13, pp. 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.009>
- CEN (2016). EN 196-1: 2016- Methods of Testing Cement. Determination of Strength. European Committee for Standardization, Brussels.
- Gkyrtis, K. (2023). Pavement Analysis with the Consideration of Unbound Granular Material Nonlinearity. *Designs*, 7 (6), pp. 142. <https://doi.org/10.3390/designs7060142>
- INTENT (2026). Intelligent health monitoring of road pavements. [online] Available at: <https://intent.ulusofona.pt/> [Accessed 22 January 2026]
- Kang, M.; Qamhia, I. I. A.; Tutumluer, E.; Hong, W-T.; Tingle J.S. (2021). Bender element field sensor for the measurement of pavement base and subbase stiffness characteristics. *Transportation research record*, 2675 (8) pp. 394–407. <https://doi.org/10.1177/036119812199835>
- Kang, M.; Qamhia, I. I.; Tutumluer, E.; Garg, N.; Villafane, W. (2022). Airport pavement stiffness monitoring and assessment of mechanical stabilization using bender element field sensor. *Transportation research record*. 2676 (8), pp. 542-553. <https://doi.org/10.1177/03611981221084685>
- Kang, M. (2023). Development and Application of Bender Element Field Sensor for Pavement Base/Subbase Modulus Characterization and Geogrid Effectiveness Evaluation. Doctoral Dissertation. University of Illinois Urbana-Champaign
- Lekarp, F.; Isacsson, U.; Dawson, A. (2000). State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates. *Journal of transportation engineering*, 126 (1), pp. 66–75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- Masad, S. A.; Little, D. N. (2004). Sensitivity analysis of flexible pavement response and AASHTO 2002 design guide to properties of unbound layers. Research report ICAR 504-1. Austin, TX: International Center for Aggregates Research. <http://hdl.handle.net/2152/35370>
- Moldovan, I. D.; Climent, N.; Bendea, E. D.; Cismasiu, I.; Gomes Correia, A. (2021). A hybrid-Trefftz finite element platform for solid and porous elastodynamics. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 124: pp. 155-173. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.12.014>
- Neves, J.; Moldovan, I.; Silva, H.; Pinto, S.; Briceño, C.; Moutinho, J.; Parente, M.; Afonso, J.; Almeida, M.; Azenha, M.; Gomes Correia, A. (2026). Sistema Integrado de Monitorização Contínua de Materiais Granulares Não Ligados em Pavimentos Rodoviários: Aplicação em Trecho Experimental. Atas do 19º Congresso Nacional de Geotecnia, Vila Real, ISB 978-989-35507-4-8, pp. 969-980.

- Robinson, W. J.; Tingle, J. S.; Tutumluer, E.; Kang, M.; Wayne, M. H.; Tamrakar, P. (2023). Using bender elements to investigate the effect of a multi-axial geogrid on aggregate layer stiffness. *Transportation research record*, 2679 (1) pp. 297–306. <https://doi.org/10.1177/03611981231152465>
- Sangsefidi, E.; Larkin, T. J.; Wilson, D. J. (2021). The effect of weathering on the engineering properties of laboratory compacted unbound granular materials (UGMs). *Construction and Building Materials*, 276, 122242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122242>
- Wang, H.; Kim, Y.; Kang, M.; Tutumluer, E.; Shoup, H. (2025). Geogrid stabilization effectiveness—Comprehensive assessment through multiscale experiments with bender element sensor technology. *Geotextiles and geomembranes*, 53 (6), pp. 1200-1214. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2025.05.006>
- Yoon, H-K.; Lee, J-S.; Kim, Y-U.; Yoon, S. (2008). Fork blade-type field velocity probe for measuring shear waves. *Modern Physics Letters B*, 22 (11), pp. 965–969. <https://doi.org/10.1142/S0217984908015681>
- Zeng, X. (2006). Applications of piezoelectric sensors in geotechnical engineering. *Smart structures and systems*, 2 (3), pp. 237–251. <https://doi.org/10.12989/sss.2006.2.3.237>