

A GEOTECNIA NA TRANSIÇÃO ECO-DIGITAL DAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

Geotechnics in the eco-digital transition of transport infrastructures

José Neves^a, João Moutinho^b, Ana Cristina Freire^c, André Paixão^c, Bernardo Monteiro^d, Manuel Parente^b, Nuno Cristelo^e, António Gomes Correia^f

^a CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

^b BUILT CoLAB, Portugal

^c Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal; CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal

^d Infraestruturas de Portugal S.A., Portugal

^e Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

^f IRISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

RESUMO – O artigo apresenta uma compilação de exemplos nacionais de investigação, desenvolvimento e inovação relacionados com a transição verde e a transformação digital no âmbito da geotecnia nos transportes e associados às terraplenagens, pavimentos e vias-férreas. No âmbito da transição verde, são apresentados exemplos de aplicação de materiais não convencionais e renováveis e de técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em relação à transformação digital, são descritos desenvolvimentos com aplicação às terraplenagens, aos pavimentos rodoviários e à via-férrea (morfologia das partículas de agregado de balastro). Os exemplos apresentados no artigo demonstram a capacidade geotécnica que as empresas e as instituições do sistema científico e tecnológico em Portugal têm para o cumprimento das metas estabelecidas para a sustentabilidade e resiliência no setor das infraestruturas de transporte.

ABSTRACT – The paper presents a collection of national examples of research, development and innovation related to the green transition and digital transformation in transportation geotechnics and related to earthworks, pavements, and railways. In the scope of the green transition, examples of the application of non-conventional and renewable materials and stabilization techniques based on the alkaline activation of industrial by-products are presented. Concerning digital transformation, developments with application to earthworks, road pavements and railways (morphology of ballast aggregate particles) are described. Those examples demonstrate the geotechnical capability and allow companies and institutions of the scientific and technological system in Portugal to fulfil the goals established for sustainability and resilience in the sector of transport infrastructures.

Palavras Chave – Geotecnia, infraestruturas de transporte, transformação digital, transição verde.

Keywords – Geotechnic, transport infrastructures, digital transformation, green transition.

E-mails: jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt (J. Neves), joao.moutinho@builtcolab.pt (J. Moutinho), acfreire@lnec.pt (A. Freire), apaixao@lnec.pt (A. Paixão), bernardo.monteiro@infraestruturasdeportugal.pt (B. Monteiro), manuel.parente@builtcolab.pt (M. Parente), ncristel@utad.pt (N. Cristelo), agc@uminho.pt (A. Gomes Correia)

ORCID: orcid.org/0000-0002-7131-7967 (J. Neves), orcid.org/0000-0003-1955-0750 (J. Moutinho), orcid.org/0000-0002-7940-2648 (A. Freire), orcid.org/0000-0002-1665-7037 (A. Paixão), orcid.org/0000-0001-5765-2622 (M. Parente), orcid.org/0000-0002-3600-1094 (N. Cristelo), orcid.org/0000-0002-0103-2579 (A. Gomes Correia)

1 – INTRODUÇÃO

A construção de qualquer infraestrutura de transporte e as necessárias intervenções de conservação ou reabilitação ao longo do seu ciclo de vida têm um enorme impacto do ponto de vista económico e ambiental. Esse impacto, como por exemplo o consumo de recursos naturais não renováveis que caracterizam a maioria das técnicas construtivas tradicionais, não é mais sustentável. O setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), na sua relação com o ambiente natural e construído desde as fases iniciais de planeamento e projeto até às fases de exploração e conservação, encontra-se em transição eco-digital para um modelo de economia circular de acordo com os princípios da sustentabilidade e ao longo do ciclo de vida das obras (Gomes Correia et al., 2022; Hossain et al., 2020; Pomponi e Moncaster, 2017).

Em 2015 foi apresentada pelas Nações Unidas (ONU) a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada por todos os Estados-Membros. Esta agenda estabelece as prioridades do desenvolvimento sustentável global para 2030 em torno de um conjunto de objetivos e metas comuns, nomeadamente erradicar a pobreza, erradicar a fome, assegurar água potável e saneamento, proteger a vida marinha e a vida terrestre, entre outros. Assim, foram definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas associadas, organizados em 5 princípios enquadramentos (5P – Pessoas, Planeta, Prosperidade, Paz e Parcerias), a integrar nas políticas, processos e ações desenvolvidas a nível nacional, regional e global (UN, 2023; Cabaço et al., 2017). O progresso dos países ao nível dos ODS tem vindo a ser monitorizado pela ONU e é expresso através do SDG Index & Monitoring. Observou-se que, entre 2015 e 2019, o progresso mundial na concretização dos 17 ODS foi de apenas 0,5% ao ano. Em 2020 e 2021 não se registaram progressos devido ao desempenho negativo dos países em desenvolvimento (Sachs et al., 2022).

A Comissão Europeia (CE) apresentou também um programa político com o objetivo de alcançar a sustentabilidade na União Europeia (EU) e fora dela. Os ODS são uma parte intrínseca das diretrizes políticas e estão no centro da formulação de políticas de ação interna e externa em todos os setores. (Cabaço et al., 2017), de modo a construir uma Europa mais verde, mais digital e mais resiliente. A CE no seu Pacto Ecológico Europeu pretende ser o primeiro continente com impacto neutro no clima até 2050, apresentar a redução de, pelo menos, 55 % das emissões de gases com efeito de estufa em comparação com os níveis de 1990 e plantar 3 mil milhões de árvores na União Europeia até 2030 (CE, 2023). Dada a necessidade de uma resposta de âmbito alargado, foi criado o Mecanismo de Recuperação e Resiliência de modo a impulsionar a UE a atingir o seu objetivo de neutralidade climática até 2050, posicionar a Europa numa via de transição digital, e tornar as economias e sociedades europeias mais sustentáveis, resilientes e preparadas para enfrentarem os desafios e aproveitarem de forma mais eficiente as oportunidades resultantes da transição ecológica e transformação digital (CE, 2023).

Portugal tem apresentado um elevado envolvimento na elaboração e na consequente implementação da Agenda 2030. Em 2017, foi reforçado o compromisso com a apresentação de um relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, o qual apresentava as ações levadas a cabo a nível nacional relativamente a cada um dos ODS (Cabaço et al., 2017). Mais recentemente, foi elaborado e encontra-se em implementação o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Este é um programa de âmbito nacional, com um período de execução previsto até 2026. Com o PRR pretende-se implementar um conjunto de reformas e de investimentos destinados a impulsionar o país na senda da retoma, do crescimento económico sustentado e da convergência com a Europa ao longo da próxima década, tendo como orientação um conceito de sustentabilidade inspirado nos ODS. O PRR está alinhado assim com os seis pilares relevantes da estratégia europeia 2030, nomeadamente a transição verde, a transformação digital e o crescimento inteligente, sustentável e inclusivo (PRR, 2023). O setor das infraestruturas de transportes é um dos exemplos da implementação do PRR, como o demonstram as muitas obras em curso associadas, principalmente, ao aumento de capacidade e reforço de acessibilidades das redes ferroviária e rodoviária, bem como de portos marítimos e plataformas logísticas.

A geotecnia sempre tem estado presente nas obras de infraestruturas de transportes e tem demonstrado que pode contribuir ativamente para o cumprimento dos objetivos da sustentabilidade, transição verde, transformação digital, e transição climática (Gomes Correia et al., 2016). Com efeito, podem ser múltiplas as possibilidades de atuação em linha com estes objetivos, como por exemplo, a utilização de materiais não convencionais, a inovação em técnicas de estabilização e a implementação de sistemas de otimização e de apoio à decisão nas várias fases do ciclo de vida das obras (e.g., *Digital Twins, Big Data, Machine Learning, Building Information Modelling*) (Gomes Correia et al., 2022).

O artigo apresenta uma compilação de exemplos nacionais de investigação, desenvolvimento e inovação relacionados com a transição verde e a transformação digital no âmbito da geotecnia nos transportes e associados predominantemente às terraplenagens, estruturas geotécnicas, pavimentos rodoviários e vias-férreas. Os exemplos que são apresentados pretendem demonstrar e promover a capacidade instalada em Portugal de empresas e instituições do sistema científico e tecnológico contribuírem em grande medida para o cumprimento das metas estabelecidas ao nível dos ODS e do PRR. No âmbito da transição verde, o artigo descreve exemplos de aplicação de materiais não convencionais e renováveis e de técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em relação à inovação na transformação digital, são apresentados vários desenvolvimentos inovadores com aplicação às terraplenagens, aos pavimentos rodoviários e à via-férrea (morfologia das partículas de agregado de balastro).

O artigo foi desenvolvido no âmbito das atividades da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes, da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), e teve como suporte a apresentação oral na sessão intitulada “Uma alavanca para a transição eco-digital nas infraestruturas de transporte” do seminário evocativo dos cinquenta anos da SPG e integrado no programa de comemorações dos setenta e cinco anos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que foi realizado em 2022 no LNEC, em Lisboa.

2 – DESENVOLVIMENTOS NO ÂMBITO DA TRANSIÇÃO VERDE

2.1 – Utilização de materiais não convencionais e renováveis

2.1.1 – Valorização e processamento de resíduos

São significativas e também crescentes as quantidades de resíduos produzidos a nível nacional e mundial, decorrentes das atividades de construção e que constituem um problema, com visíveis impactos económicos, sociais e ambientais. A deposição continuada dos resíduos produzidos, em especial nas atividades relacionadas com a engenharia civil, em aterros não controlados, traduz-se em elevados impactos ambientais, contribuindo para uma diminuição dos recursos finitos e não renováveis do nosso planeta. A consciencialização da necessidade de reutilizar e de reciclar estes materiais, reduzindo o volume a conduzir a aterro e até mesmo com o objetivo final de eliminar completamente a sua deposição em aterro, conduz à necessidade de adotar uma adequada gestão de resíduos com a aplicação de ações que promovam a efetiva redução das quantidades produzidas. Uma adequada conceção, baseada nos princípios do *Ecodesign* e do modelo *Cradle to Cradle* (“do berço ao berço”) permitirá promover, a reutilização, recuperação ou reciclagem dos materiais aplicados, durante as futuras operações de conservação e/ou reabilitação, tendo presente o conceito de ciclo de vida das infraestruturas e dos materiais aplicado à Economia Circular.

A utilização de materiais não convencionais e renováveis em infraestruturas de transportes e em obras geotécnicas, em alternativa aos materiais naturais de existência finita, nas atividades relacionadas com a engenharia civil constitui-se como a alternativa económica e ambientalmente viável a adotar. Os agregados reciclados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), nomeadamente betão britado, betão misto ou Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR, ou RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*, na terminologia inglesa) apresentam-se como alternativa aos

agregados naturais. Pode ainda referir-se os agregados artificiais, nomeadamente as escórias de aciaria e as escórias de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Sendo que todos estes agregados devem cumprir com as exigências de qualidade e durabilidade adequadas às aplicações previstas, nomeadamente em infraestruturas de transportes e em obras geotécnicas.

A indústria europeia de agregados constitui a maior parte do setor extrativo não energético na União Europeia, com 3 bilhões de toneladas produzidas anualmente: 46,6% de agregado natural britado; 38,7% de areia e seixo; 10,6% de agregados reutilizados e reciclados; 2% de agregados marinhos; e 2% de agregados artificiais (UEPG, 2022). Em Portugal, a produção média anual de agregados, estimada em 2019, é de 41 milhões de toneladas (UEPG, 2022), consumidos sobretudo nas atividades de construção, conservação e reabilitação. Nas últimas décadas, as infraestruturas de transportes têm sido um importante consumidor destes materiais. Portugal tem fontes significativas de agregados naturais (e.g., basalto, granito e calcário), no entanto, o seu transporte para zonas urbanas, onde o seu consumo é maior, é uma condição que afeta os seus custos.

No que se refere à produção de RCD, estima-se que em Portugal a produção anual seja de cerca de $11,40 \times 10^6$ ton, com uma taxa de recuperação de 74%, sendo assim fundamental que estes sejam reciclados ou reutilizados em obras de engenharia civil, nomeadamente infraestruturas de transportes (Reis et al., 2021). Em Portugal têm sido realizados diversos estudos, com a aplicação de agregados reciclados de RCD em infraestrutura de transportes, com apresentação de metodologias, características e avaliação de desempenho, que evidenciam o potencial de aplicação daquele tipo de agregados.

No caso particular das MBR, estas são produzidas anualmente em quantidades muito significativas em Portugal e também em todo o mundo, como resultado de operações de conservação e reabilitação de pavimentos com camadas betuminosas. Como principal característica das MBR refere-se o facto de poderem ser 100% reutilizadas sem que ocorra a redução das suas propriedades e das suas funções (Antunes et al. 2021). A sua incorporação conduz a evidentes benefícios económicos, sociais e ambientais, com impactos diretos na redução da procura de matérias-primas - agregados e betume -, e dos custos e impactos associados ao fabrico, transporte e aplicação de novas misturas betuminosas, nomeadamente através da redução da emissão dos gases com efeito de estufa. A incorporação de MBR em novas misturas betuminosas pode conduzir a uma redução até cerca de 70% dos custos (Antunes et al. 2019). Complementarmente refere-se a capacidade de multi-reciclagem que as MBR apresentam, com a possibilidade de reutilizações sucessivas, durante a vida útil do pavimento, sem redução das suas funções (Antunes et al. 2021).

Na Figura 1 são apresentadas as percentagens de MBR reutilizadas ou recicladas em diversos países europeus e nos EUA. A operação identificada como reutilização corresponde ao uso da MBR sem redução das suas propriedades e funções e a reciclagem corresponde à sua aplicação em camadas de fundação ou aterro ou outras em que se verifica uma diminuição das suas funções (EAPA, 2023). Observa-se existirem países com elevada taxa de reutilização e de reciclagem, a que corresponde uma reduzida deposição em aterro. Contudo existem ainda países com valores elevados de MBR depositados em aterro, ou outros para os quais não existem dados disponíveis.

Em Portugal, as especificações técnicas existentes permitem a incorporação de MBR, com diferentes percentagens em função da camada onde são aplicadas. Assim, são definidos vários requisitos técnicos, nomeadamente a avaliação da presença de matéria estranha (deve ser inferior a 1% para a camada de desgaste e inferior a 5% para as restantes camadas e a presença de madeira, plástico ou materiais sintéticos deve ser inferior a 0,1%); as propriedades do ligante existente na MBR devem ser avaliadas; a quantidade máxima de MBR é definida em função das propriedades e eventuais modificações do ligante, do tipo de camada e da presença de matéria estranha; o teor em água máximo é de 5% e a dimensão máxima das partículas é de 32 mm (Antunes et al. 2019).

Nas secções seguintes são apresentados diversos exemplos nacionais de utilização de materiais não convencionais e renováveis em infraestruturas de transportes, onde se incluem predominantemente os agregados reciclados.

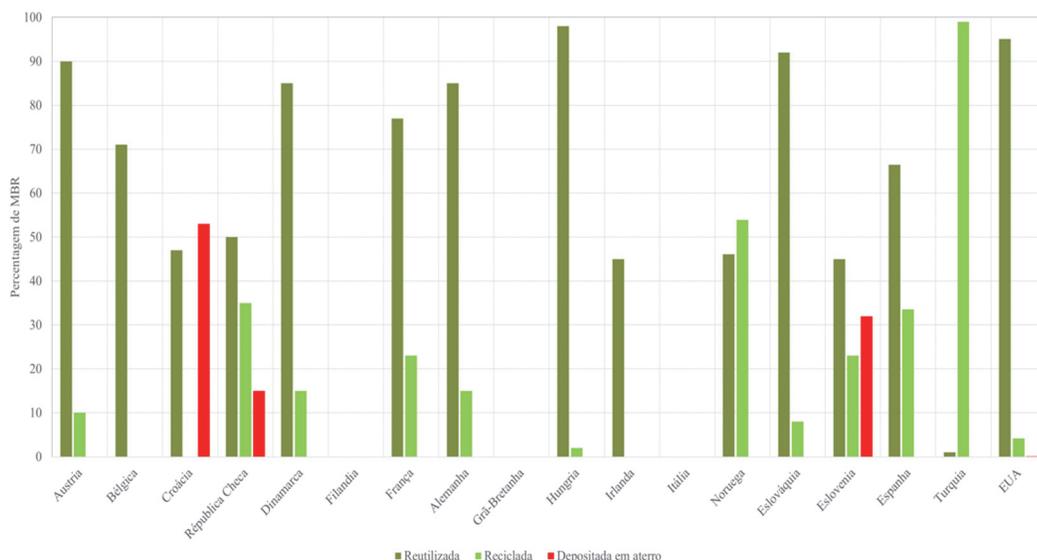


Fig. 1 – Quantidades de MBR produzidas e aplicadas (adaptado de EAPA, 2023).

2.1.2 – Aplicações em infraestruturas de transportes

Como agregados não convencionais e renováveis referem-se, entre outros, os agregados reciclados obtidos a partir de betão britado e de betão britado misto que constituem uma significativa fonte de materiais decorrentes das atividades de construção civil. Por outro lado, a maioria dos pavimentos rodoviários existentes a nível mundial são constituídos por camadas betuminosas, sendo que as MBR resultantes de processos de fresagem ou de britagem são um material reciclado passível de ser aplicado em operações de conservação e reabilitação de pavimentos, nomeadamente em camadas granulares não ligadas e no também fabrico de novas misturas betuminosas, a frio “in situ” ou a quente em central. Complementarmente têm sido realizados vários estudos para avaliação da viabilidade de incorporação de diversos tipos de resíduos em infraestrutura de transportes. Referem-se o vidro britado, borracha de pneus, escórias de aciaria, balastro reciclado e plástico reciclado, entre outros (ARRB, 2022).

Nas últimas décadas, têm vindo a ser desenvolvidos diversos estudos e projetos de investigação e inovação com vista à identificação, caracterização e validação de características, métodos de avaliação e de tecnologias de aplicação de agregados reciclados em camadas não ligadas. Referem-se os projetos ALT-MAT (*ALternative MATerials in road construction project*) e SAMARIS (*Sustainable and Advanced MATerials for Road InfraStructure*) (European Commission, 2001a; SAMARIS, 2004). Destaca-se ainda o projeto DIRECT_MAT (*DISmantling and RECycling Techniques for road MATerials – Sharing knowledge and practices*) cujos principais objetivos foram partilhar e disseminar, à escala europeia, o conhecimento nacional dos vários países envolvidos e as práticas verificadas “in situ” sobre a demolição e reciclagem de pavimentos e de materiais relacionados com pavimentos de modo a incentivar e melhorar as práticas de reciclagem para a construção e a conservação de infraestruturas rodoviárias (European Commission, 2011b). Com o projeto RE-ROAD (*End of Life Strategies of Asphalt Pavments*) pretendeu-se desenvolver os conhecimentos e as tecnologias inovadoras existentes e identificadas para estratégias de fim de vida de infraestruturas betuminosas rodoviárias. Estas estratégias apresentam um significativo impacto na eficiência energética e na pegada ambiental do sistema de transportes europeu, enquadrada na lógica do ciclo de vida das infraestruturas (Kalman et al., 2013).

A nível nacional é de referir o projeto SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Reciclados de Construção e Demolição Materiais em Infraestruturas Rodoviárias* – que foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de 2010 a 2014, em cooperação com o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. O projeto teve como objetivo principal promover a aplicação sustentável e resiliente de RCD nas camadas de base, sub-base e leito de pavimento em estradas, dando assim resposta às questões levantadas pela comunidade técnica nacional e internacional sobre a sua reciclagem (Freire et al., 2019).

Este projeto incluiu um programa experimental extenso e detalhado, com a avaliação das características geoambientais e geomecânicas de diferentes tipos de RCD selecionados, considerando: a origem, metodologia de triagem e composição final; a comparação do comportamento de camadas granulares não ligadas com ou sem agregados reciclados; a determinação dos parâmetros a usar no dimensionamento de pavimentos, considerando a aplicação de RCD e avaliação das metodologias construtivas a aplicar, função do tipo de RCD, para camadas não ligadas de base e de sub-base e de leito de pavimento. Foi construído um trecho experimental à escala real, que foi instrumentado com extensómetros e células de carga, tendo em vista obter informações sobre as extensões e tensões registadas no interior das camadas construídas com os RCD durante a realização de ensaios de carga com defletómetro de impacto (FWD). Os ensaios de FWD foram realizados durante e após a construção do trecho experimental, permitindo efetuar a avaliação do comportamento mecânico das camadas constituídas por RCD. A análise global do comportamento do pavimento do trecho experimental, a par da leitura da instrumentação aplicada, permitiu obter módulos de deformabilidade das camadas constituintes e a consequente validação da capacidade de carga dos materiais reciclados aplicados. A Figura 2 apresenta os módulos de deformabilidade da camada granular, obtidos por *back analysis* para cada secção (T1 a T4) do trecho experimental, a partir dos resultados dos ensaios de FWD efetuados no início do outono (setembro de 2012) e no início da primavera (abril de 2013). Os resultados evidenciam que os agregados reciclados, apesar de apresentarem um comportamento diferente dos materiais naturais, tiveram, no entanto, um comportamento mecânico adequado (Freire et al. 2019; Neves et al. 2023).

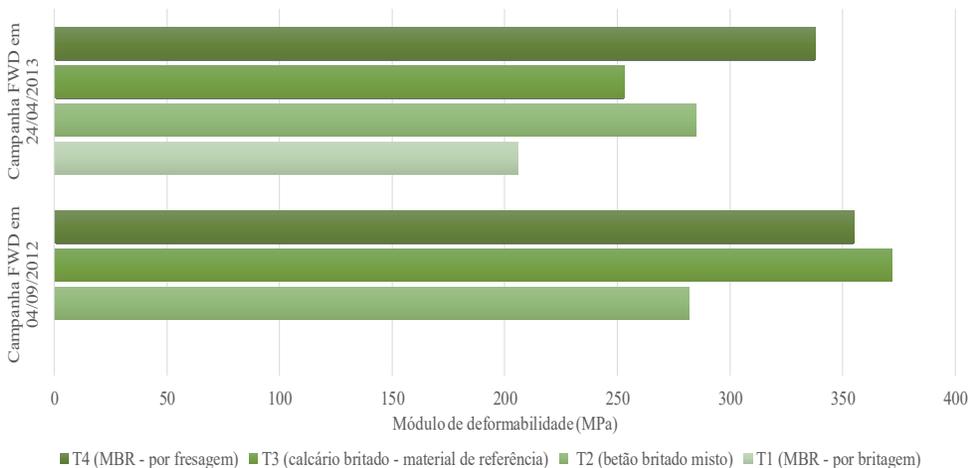


Fig. 2 – Módulos de deformabilidade de materiais aplicados em camada de base granular.

No que respeita à reciclagem de MBR, a aplicação em camadas ligadas ou não ligadas de pavimentos rodoviários é já comum ser adotada em vários países. Destacam-se em particular os países onde os agregados naturais de qualidade são escassos ou mesmo inexistentes, que têm promovido o incremento da percentagem de incorporação de MBR até 100%, conduzindo a uma

efetiva redução dos custos associados às atividades de construção, conservação e reabilitação de estradas. A multi-reciclagem de MBR, com o uso de materiais não tradicionais e renováveis, é um passo ainda maior na direção da economia circular de materiais com a reutilização das MBR ao longo da vida das infraestruturas rodoviárias, em vários ciclos, sem que seja diminuída a sua funcionalidade e sem perda de valor (Antunes et al., 2019).

Mais recentemente foi desenvolvido um extenso estudo laboratorial que pretendeu avaliar a capacidade de multi-reciclagem de MBR considerando elevadas taxas de incorporação (75%) em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários. Para estudar o desempenho ao longo do ciclo de vida, foram avaliadas misturas betuminosas com e sem envelhecimento, através da aplicação de um processo de envelhecimento acelerado em laboratório. Em seguida, as misturas betuminosas foram avaliadas em termos do seu desempenho mecânico. O estudo realizado compreendeu dois ciclos de reciclagem das MRB tendo permitido concluir que as misturas betuminosas apresentaram, em geral, um desempenho melhor do que as misturas betuminosas produzidas apenas com a incorporação de materiais virgens. Foi também possível concluir que o fracionamento das MBR e a caracterização do betume proveniente das MBR são procedimentos chave para garantir a homogeneidade final das novas misturas betuminosas produzidas com a incorporação de MBR, sobretudo nos casos de elevadas taxas de incorporação. A utilização de um rejuvenescedor de base vegetal permitiu recuperar com sucesso as propriedades do betume envelhecido nas MBR. Foi assim possível demonstrar a capacidade de multi-reciclagem das misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de MBR, com a validação do seu desempenho adequado a curto e longo prazo para aplicação em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários (Antunes et al. 2021).

De 2005 a 2008 decorreu o projeto intitulado “Aplicação de resíduos em infraestruturas de transportes e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria” que pretendeu promover a valorização das escórias produzidas nos fornos elétricos de arco da Siderurgia Nacional como agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC) através da sua utilização como material de construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas (Gomes Correia et al., 2009 e 2012).

O projeto ADVAMCE – Desenvolvimento de técnicas de valorização de materiais reciclados para promoção da economia circular nas infraestruturas de transporte – foi desenvolvido de 2018 a 2022 em cooperação com o Brasil. Neste projeto foi investigada a utilização de 100% de betão britado reciclado em misturas tratadas com baixas dosagens de cimento e reforçadas com fibra de coco para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (Crucho et al., 2022).

Em 2022 foi iniciado o projeto be-READY (*Resilient Road Pavements for Sustainability*) sobre técnicas de reciclagem de camadas ligadas em pavimentos rodoviários, em cooperação com a Noruega. O projeto tem o objetivo de desenvolver uma metodologia de cálculo para estimar o custo real de misturas betuminosas, incorporando também materiais não convencionais, considerando as emissões de gases com efeito de estufa avaliadas no ciclo de vida das obras.

2.1.3 – Legislação e documentos normativos

São vários os documentos técnicos e legislativos de suporte internacionais e nacionais para a utilização de materiais não convencionais e renováveis em engenharia civil e, nomeadamente, em infraestruturas de transportes. Refere-se o Regime Geral de Gestão de Resíduos (Decreto-Lei nº102/2020), a Lista Europeia de Resíduos (LER) e as especificações LNEC, enquanto guias para a utilização de agregados reciclados em betão, misturas betuminosas a quente em central, camadas granulares não ligadas, caminhos rurais e florestais e ainda no preenchimento de valas.

Para promover a valorização e a incorporação de RCD em obra e após operação de tratamento, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), enquanto entidade responsável pela implementação das políticas de ambiente em Portugal, apresenta diversos documentos (Regras Gerais) relativos a fresagem e britagem de RCD, resíduos de balastro da via-férrea, e incorporação de resíduos de betão e de RCD mistos.

No âmbito do projeto SUPREMA foi desenvolvido um catálogo de pavimentos destinado à aplicação de RCD em estradas e arruamentos de baixo tráfego. As estruturas tipo do catálogo são caracterizadas por camadas não ligadas de base e de sub-base constituídas por agregado reciclado de resíduos mistos, provenientes da britagem de alvenaria e de betão, ou por agregado reciclado resultante da mistura de resíduos, provenientes de MBR (30%), com agregado natural britado de granulometria extensa (70%) (Neves et al., 2016).

2.2 – Técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais

2.2.1 – Produção de cimentos alcalinos

A transição verde no âmbito da geotecnia, tal como no âmbito de toda a atividade da indústria da construção, assenta sobretudo em dois fatores fundamentais, tendo em conta as especificidades desta atividade que requer grandes volumes de matérias-primas mas, ao mesmo tempo, permite que estas possam ser provenientes de outras atividades industriais:

- A possibilidade de aplicar (reciclar) grandes volumes de materiais granulares, de natureza mineral, excedentários das indústrias mineira, metalúrgica, da queima de carvão em centrais termelétricas, da própria construção, entre outros que, para já, podem não ser tão representativos, mas possuem elevado potencial (Provis e van Deventer, 2014).
- O elevado consumo do cimento Portland, cuja produção mundial constitui o terceiro maior responsável pela emissão de CO₂-eq, apenas atrás dos Estados Unidos e da China (Pourakbar e Huat, 2017). O desenvolvimento de um ligante com menor pegada ecológica, capaz de substituir o cimento Portland, constituiria um avanço tecnológico com elevada repercussão nas preocupações ambientais que crescem, inexoravelmente, há décadas.

Ora, a geotecnia constitui uma das áreas em que estes dois grandes pilares contributivos da indústria da construção para uma maior sustentabilidade ambiental são mais expressivos, tendo em conta as necessidades elevadas de matéria-prima envolvida em diversos tipos de obra geotécnica, que englobam sobretudo materiais granulares, mas também, embora numa dimensão inferior, os ligantes utilizados na estabilização de solos ou de resíduos industriais a utilizar como material granular, na substituição de solos naturais.

O conhecimento e interesse nos designados “cimentos alcalinos”, nomeadamente para substituição do tradicional cimento Portland, em muitas das aplicações em que este é considerado como sendo a solução mais comum e eficaz, está a aumentar há sensivelmente duas décadas. Este tipo de cimento é baseado em excedentes industriais, que são “ativados” por aditivos fortemente alcalinos, e podem constituir vantagens ao nível da sustentabilidade, mas também do ponto de vista económico e, sobretudo, técnico. Contudo, o conhecimento sobre o comportamento constitutivo dos solos estabilizados com este tipo de ligantes é ainda escasso (Correa-Silva et al., 2021), estando o esforço da investigação específica centrado ainda no desenvolvimento de cimentos otimizados para cada tipo de solo (nomeadamente ao nível da reologia), por um lado, e nas condições de aplicação, por outro. São agora necessários estudos laboratoriais e trabalhos de campo destinados à avaliação da durabilidade e sustentabilidade ambiental e da recolha de informação que permita desenvolver a modelação constitutiva das misturas solo – cimento alcalino.

A presente secção pretende descrever resumidamente o atual panorama da utilização de excedentes industriais na estabilização de solos, com uma forte componente associada aos referidos cimentos alcalinos, tendo em conta que constituem, dada a sua versatilidade, robustez e adaptabilidade, uma solução muito promissora, capaz de substituir o cimento Portland nas aplicações atuais em geotecnia e, mais relevante, capaz de tornar viável a utilização de excedentes industriais cuja aplicação, hoje em dia, não é adequada, dado o potencial de contaminação que representam. São apresentados também alguns trabalhos relacionados com o estudo do comportamento constitutivo de solos estabilizados com cimentos alcalinos, bem como um caso de obra relacionado com a estabilização de um pavimento rodoviário.

Uma muito significativa parte da abundante literatura científica disponível sobre o uso de cimentos alcalinos (AAC – *alkali activated cements*, na terminologia inglesa) como alternativa ao cimento Portland (OPC) considera a falta de recursos materiais, designados por “precursores” como o grande obstáculo à produção, à escala industrial, destes cimentos. Embora um número substancial de trabalhos científicos mostre claramente que as matérias-primas (precursores) necessárias para a fabricação de AAC existem em abundância em qualquer parte do mundo, é também verdade que a adequabilidade destes recursos não é constante, uma vez que alguns países possuem uma clara abundância de precursores muito eficazes (e.g., escória de alto-forno), enquanto outros países possuem uma abundância de excedentes industriais muito menos eficazes ou, pelo menos, mais exigentes do ponto de vista da sua preparação para utilização no fabrico de AAC.

Portugal constitui um exemplo claro dos países cujos tipos de excedentes industriais só começaram a ser estudados em AAC mais recentemente, quando se tornou evidente o potencial desta tecnologia e, ao mesmo tempo, se tornou evidente o interesse em diversificar as respetivas fontes de matéria-prima, de modo a permitir a utilização de AAC em qualquer região ou país do globo e, mais importante ainda, de modo a permitir incorporar praticamente qualquer tipo de resíduo ou subproduto. Este último aspeto é muito relevante, tendo em conta que cada país produz, de forma preferencial, diferentes tipos de excedentes industriais – por exemplo, a biomassa poderá ser a principal preocupação em alguns países, enquanto, noutras geografias, as escórias de aciaria poderão constituir o maior interesse, a nível de escoamento, sendo ambos igualmente incorporáveis em AAC, desde que previamente tratados de forma adequada. O cenário português tornou-se, recentemente, e no que respeita à utilização de AAC, ainda mais dependente da otimização dos excedentes industriais autóctones, aquando do fecho da central termoelétrica do Pego, que, nas primeiras duas décadas de disseminação desta tecnologia, forneceu cinzas volantes para grande parte dos trabalhos de investigação realizados neste país.

A outra grande vertente, e talvez principal condicionante no que respeita às questões ambientais que envolvem a utilização de AAC, está relacionada com os chamados “ativadores”. Na esmagadora maioria dos trabalhos desenvolvidos, a nível mundial, foram utilizados reagentes comerciais, nomeadamente uma solução à base de hidróxido de sódio e/ou silicato de sódio. Contudo, os potenciais ativadores não se limitam a estes dois reagentes. Várias outras possibilidades estão já disponíveis, ou em avançado estado de desenvolvimento, a maioria com claras vantagens, sobretudo no que respeita à emissão de CO₂-eq associada à respetiva produção (quer o hidróxido quer o silicato possuem elevadas taxas de emissão de CO₂-eq) (Garcia-Lodeiro et al., 2020).

A fechar a lista de potenciais “dificuldades” à disseminação dos cimentos alcalinos na indústria da construção, de forma geral, está a questão da produção. Esta dificuldade, tal como as duas anteriores, não será um entrave durante muito tempo, dado que a versatilidade dos processos de produção de AAC faz com que a maioria das tecnologias necessárias ao fabrico, em larga escala, de AAC, esteja já instalada nas atuais fábricas de OPS, não sendo necessário nenhum grande investimento para transformar uma fábrica de cimento Portland numa fábrica de cimentos alcalinos (Palomo et al., 2021), permitindo garantir, sem transformações avultadas, a qualidade e constância composicional dos cimentos alcalinos produzidos à escala industrial. A Figura 3 resume as principais etapas associadas à produção de cimento Portland e à potencial produção de um cimento alcalino, baseado num subproduto industrial (e.g., cinzas volantes, escória de aciaria, escória de queima de resíduos sólidos urbanos). Embora constituam trajetórias algo semelhantes, baseadas na recolha de matéria-prima e na sua subsequente preparação (nomeadamente através de calcinação e moagem), uma observação mais cuidada permite identificar várias vantagens ambientais, principalmente no que respeita às temperaturas de calcinação e na libertação de CO₂ associada aos materiais à base de cálcio, aspeto fundamental na obtenção do clínquer. Contudo, a própria recolha de matéria-prima será significativamente mais económica e ambiental e financeiramente mais económica, no caso dos cimentos alcalinos, em que os materiais foram já produzidos e requerem apenas transporte.

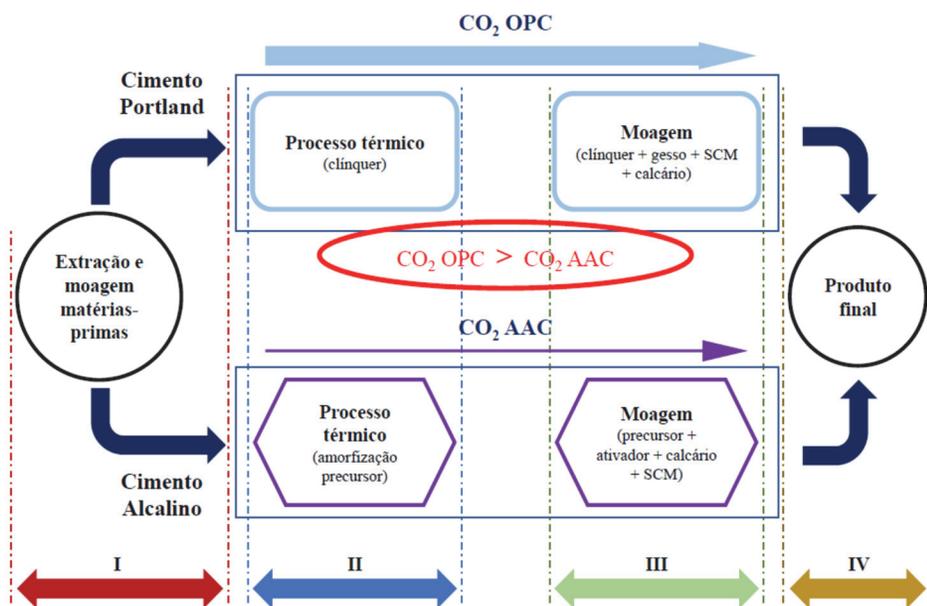


Fig. 3 – Comparação direta entre processos de produção de cimento Portland e de cimentos alcalinos (reprodução com permissão de Palomo et al., 2021).

2.2.2 – Aplicações

Além das dificuldades associadas à variabilidade composicional e estado físico dos diferentes precursores e ativadores, resultado direto da composição heterogénea de cada resíduo, subproduto ou desperdício ambiental gerado, existem, no contexto específico da geotecnia, dificuldades adicionais, incluindo, à cabeça, aquelas relacionadas com a forma de estudo dos solos ou excedentes industriais estabilizados com cimentos alcalinos. De referir que ao longo desta secção, salvo indicação em contrário, não é feita uma distinção entre solos naturais e alguns excedentes industriais com características físicas e mecânicas idênticas, como, por exemplo, as areias de fundição ou o rejeitado mineiro. De facto, as técnicas até aqui utilizadas baseiam-se fortemente (salvo nas situações em que um determinado laboratório ou grupo de investigação já desenvolveu procedimentos alternativos e específicos para estes novos materiais) nas técnicas comumente utilizadas em solos naturais e no estudo da estabilização desses mesmos solos naturais. A título de exemplo, refira-se a simples questão da avaliação da compactação dos materiais granulares estabilizados, em que a própria fase líquida da mistura contém moléculas (e.g. NaOH) que contribuem significativamente para o peso volúmico seco do material; ou o cálculo do teor em água ótimo para compactação, que terá de ser calculado através da secagem em estufa do material, o que produz alterações muito significativas no processo de cura e desenvolvimento de reações (Cristelo et al., 2018). Podendo eventualmente parecer uma questão de somenos importância, não deixa de criar constrangimentos na fase de otimização das misturas e da previsão da sua aplicação em obra.

Acresce que o uso de AAC para melhorar as propriedades geotécnicas de materiais granulares ainda é relativamente incipiente. O desempenho mecânico, sobretudo, necessita de mais investimento a nível da investigação das suas capacidades, limitações, comportamento e, muito importante, das dificuldades logísticas associadas à sua aplicação em obra, dado tratar-se de um ligante que, normalmente, envolve mais componentes e pode, em alguns casos, ser mais sensível às condições na fase de preparação, aplicação e cura.

2.2.3 – Caso de estudo

Um dos exemplos mais relevantes do potencial dos AAC em geotecnia e, concretamente, na estabilização de camadas de base ou sub-base de pavimentos, foi desenvolvido recentemente, em Portugal, no âmbito de uma colaboração entre duas universidades nacionais e uma das principais empresas de construção portuguesas.

Foi construído um trecho experimental com um total de 80 m de camada estabilizada, com 2,5 m de largura, utilizando cinco ligantes diferentes, três dos quais baseados na ativação alcalina de excedentes industriais, sendo que os outros dois (cal e cimento Portland) foram incluídos de modo a criar referências para futuras comparações (Miranda et al., 2020). Cinzas volantes, resultantes da queima de carvão na Central do Pego, constituíram o precursor utilizado nos três AAC. Em dois casos, essas cinzas foram ativadas através de uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio, enquanto no terceiro caso foi utilizado igualmente um resíduo industrial, nomeadamente uma solução alcalina originalmente utilizada para limpar matrizes de extrusão de alumínio.

O desempenho de cada secção do trecho foi avaliado aos 36 e 90 dias de cura, e incluiu ensaios de FWD e ensaios de carga em placa, e a determinação, em amostras extraídas diretamente no pavimento, da resistência à compressão simples. A preparação do local teve início 48 horas antes do início do trecho estabilizado, e envolveu a remoção de uma fina camada de solo superficial; ensaios de FWD ao longo do eixo; e avaliação do teor de água em vários pontos (gamadensímetro). Devido às diferenças significativas entre o teor em água *in situ* e o teor em água necessário (determinado previamente em laboratório, para cada uma das 5 soluções), optou-se por reduzir o teor em água através da mistura com 3% de óxido de cal. Este procedimento foi realizado 24 horas antes da estabilização, mas não foi totalmente eficaz, resultando na compactação das camadas estabilizadas no lado húmido das respetivas curvas de compactação Proctor.

Antes da construção dos segmentos FA20a, FA20b e FA20CS, foi necessário calibrar a vazão de FA por metro quadrado. Os segmentos estabilizados com cimentos álcali-ativados foram construídos com a seguinte sequência: i) distribuição de aproximadamente 1/3 do volume de cinzas pré-determinado (Figura 4a), seguido de uma primeira passagem da misturadora (calibrada para uma espessura de 20 cm); ii) repetição da etapa i; iii) Espalhamento manual de aproximadamente 1/2 do peso predeterminado de ativadores alcalinos (Figura 4b), seguido de mais uma passagem da misturadora (uma espessura de 20 cm foi novamente visada); iv) repetição da etapa i; v) repetição da etapa iii; vi) compactação da mistura estabilizada, segundo o procedimento tradicionalmente utilizado. A carotagem das várias secções de pavimento (Figura 4c) permitiu a determinação da resistência à compressão simples, em laboratório, que revelaram valores muito semelhantes obtidos com a solução tradicional (i.e., OPC), e com todas as soluções AAC, das quais se destaca a solução que utilizou um ativador-resíduo (Figura 4d).

2.3 – Desafios do projeto à obra

2.3.1 – Metodologia

Tradicionalmente nas infraestruturas lineares de transporte, como é o caso das rodovias e ferrovias, assumiu-se desde sempre uma política de equilíbrio de materiais na sua conceção e construção, com principal relevo no balanço de terras, uma vez que este também era o mais relevante em termos quantitativos. Este equilíbrio prevenia desde logo a produção de resíduos, atuando-se assim no primeiro pilar de gestão – a prevenção (Sousa e Monteiro, 2009). A conceção destas infraestruturas combina as exigências geométricas de traçado adequadas ao seu desempenho, a sua inserção na orografia existente e as condições geotécnicas decorrentes do ambiente geológico que é atravessado em cada momento. Tal conduziu a uma prática, consolidada em termos de projeto e validada tecnicamente no domínio da geotecnia de reutilização preferencial na própria obra dos solos e rochas escavados.



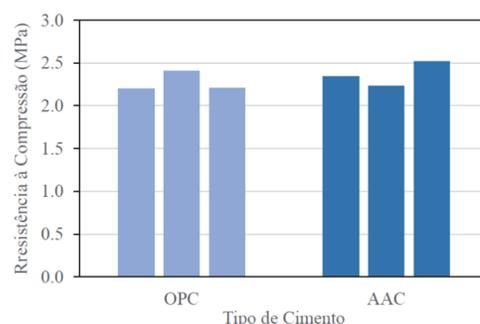
a)



b)



c)



d)

Fig. 4 – Evolução do processo construtivo de secção do trecho experimental baseada em cimentos alcalinos: a) espalhamento do precursor (i.e., cinzas volantes); b) espalhamento do ativador (i.e., hidróxido de sódio seco); c) aspeto de carotes recolhidas; d) resistência à compressão em carotes recolhidas nas secções construídas com OPC e com AAC.

A crescente tomada de consciência das questões ambientais e a sua transposição para normativos legais, que obrigam a estudos de impacto e a processos de avaliação ambiental, fez emergir frequentemente outros conjuntos de prioridades na definição de traçados em desprimento de soluções equilibradas de terraplenagem, originando assim a movimentação de volumes significativos de materiais de empréstimo e a depósito. De igual modo, o atravessamento de zonas sensíveis, como é o caso das áreas urbanas, podem levar à necessidade de adoção de soluções geotécnicas distintas, como obras de contenção ou túneis, que, embora possam contribuir para a redução dos volumes totais de terraplenagem, tendem a limitar a reutilização de materiais escavados, que têm de ser transportados para destino final adequado com consequências económicas e ambientais.

Também o atual Regime Geral de Gestão de Resíduos traz novos desafios aos projetos e empreitadas de infraestruturas de transporte, em especial, na caracterização, eventual transformação e quantificação dos resíduos a reutilizar. Desafios estes que se estendem ao fluxo dos geomateriais excedentes, que passarão a ser geridos de acordo com as regras associadas à gestão de resíduos.

Se atualmente a utilização de materiais não convencionais e renováveis se encontra tecnicamente suportada para um conjunto importante de materiais, a escala a que estes se encontram disponíveis nem sempre é compatível com as necessidades destas infraestruturas lineares. Acresce,

que o seu processo de valorização pode trazer um incremento de custos que diminui ou condiciona fortemente a sua competitividade face aos materiais tradicionais.

O caminho da utilização de ligantes na estabilização de solos *in situ* ou de resíduos industriais a utilizar como material granular, que agora enfrentam novos desafios, tem demonstrado ser bastante versátil nas suas aplicações, com ligantes de cal ou de cimento, em especial, na estabilização/reutilização de materiais com fracas características geotécnicas ou no reforço do desempenho de geomateriais em zonas nobres de terraplenagem, existindo cadernos de encargos com especificações técnicas para o efeito. Estas soluções, tem implicações ambientais positivas face ao potencial de redução do volume de terraplenagens, e, consequentemente, no consumo de energia. A mistura de solos com ligante e água pode ser efetuada em central ou *in situ*, sendo espalhada e compactada em continuidade, revelando-se uma tecnologia muito competitiva do ponto de vista económico. Em obras lineares extensas, a utilização de equipamentos que processam as misturas *in situ* torna-se mais interessante tendo em atenção a sua mobilidade (Fernandes et al., 2016).

Outro dos aspetos que emergem como relevantes no âmbito na transição eco-digital das infraestruturas lineares de transporte é a resiliência, tema que também se encontra incluído no plano estratégico 2020-2023 do Comitê Técnico 4-3 “Terraplenagem” da Associação Mundial de Estradas (PIARC, 2021). No âmbito das terraplenagens e das estruturas geotécnicas, entende-se como adequada a definição proposta por Onishi et al. (2018) para sistemas de transporte, de acordo com a qual a resiliência é: “a capacidade do ativo de resistir a choques de forma a minimizar as perdas de funcionalidade (ou seja, robustez ou resistência) e a capacidade do ativo de recuperar a funcionalidade em várias dimensões após um evento de desastre (ou seja, recuperabilidade)”.

Neste contexto, a resiliência dos ativos geotécnicos é suportada pela interligação dos pilares constituídos pelas especificações técnicas de projeto e pelas condições técnicas na construção (Cadernos de Encargos), em função do pilar das condições geológicas vigentes e dos geomateriais e/ou materiais não convencionais que se entendam aplicar (Figura 5).

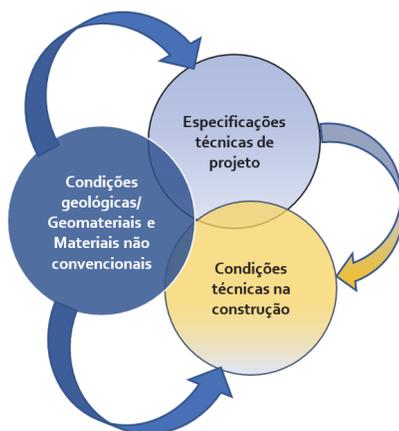


Fig. 5 – Interligação das especificações técnicas de projeto e as condições técnicas na construção, em função das condições geológicas e dos geomateriais e/ou materiais não convencionais.

2.3.2 – Exemplo de aplicação

O troço da autoestrada A4 entre Amarante e Vila Real, que engloba o túnel do Marão, desenvolve-se a meia encosta em zona de orografia acidentada. A inserção do traçado rodoviário nesta zona de montanha obrigou a um exercício de equilíbrio em relação, para além do desenho e construção de várias estruturas de contenção em aterro reforçado, ao desenvolvimento de soluções

em solo-cimento para a execução de aterros de grandes dimensões, com altura máxima da ordem de 70 m. A Figura 6 mostra o perfil transversal tipo e as características gerais das soluções em aterro. Estes aterros, cujas principais características são apresentadas no Quadro 1, foram construídos com material do tipo solo-enrocamento com os espaldares reforçados em solo-cimento (adição de cimento na proporção ponderal de cerca de 3 a 4%).

A adoção destas soluções em aterro, com a execução *in situ* dos espaldares reforçados em solo-cimento, permitiu incorporar um volume importante de materiais provenientes das escavações da linha e do túnel do Marão, mantendo uma ocupação de terreno razoável devido à possibilidade de adotar maiores inclinações dos taludes (V/H=1/1). Estas soluções permitiram a rentabilização sustentável dos recursos locais e ficaram bem integradas na paisagem.

Quadro 1 – Características gerais dos aterros (Elsamex, 2014a e 2014b).

Características gerais	Designação do aterro			
	M14	M24	M40	M41A
Extensão longitudinal (m)	558	423	304	336
Altura máxima (m)	69	55	24	52
Número de banquetas	4	3	0	2
Largura máxima dos espaldares (m)	20	16	7	10
Volume de solo-cimento (m ³)	175000	125000	30000	85000
Volume de aterro (m ³)	510000	175000	20000	210000

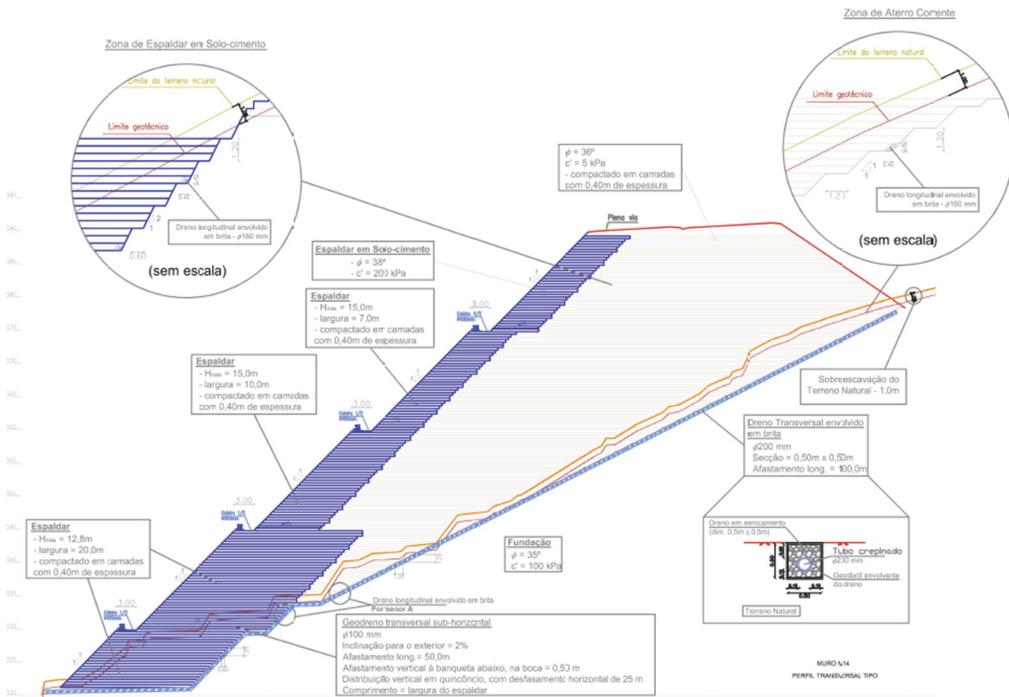


Fig. 6 – Perfil transversal tipo e características gerais das soluções em aterro com espaldares reforçados em solo-cimento (Fernandes et al., 2016).

Para a confirmação dos pressupostos de projeto foi desenvolvida uma metodologia para a definição da mistura de solo-cimento a aplicar em obra assim como a sua técnica de aplicação, que se representa de forma esquemática na Figura 7. Em fase de obra, consentaneamente com o processo de controlo de qualidade definido para os aterros, foi efetuado o controlo dos parâmetros relativos ao solo-cimento, recorrendo à execução de ensaios de laboratório e *in situ*, primeiro em aterros experimentais, e de modo sistemático, durante a construção destes aterros.

Estas estruturas de aterro enquadraram-se naturalmente na paisagem com o crescimento de vegetação autóctone, sem ser necessário o recurso a sementeiras. A observação do comportamento destes aterros tem vindo a demonstrar o seu bom desempenho ao longo de uma década.

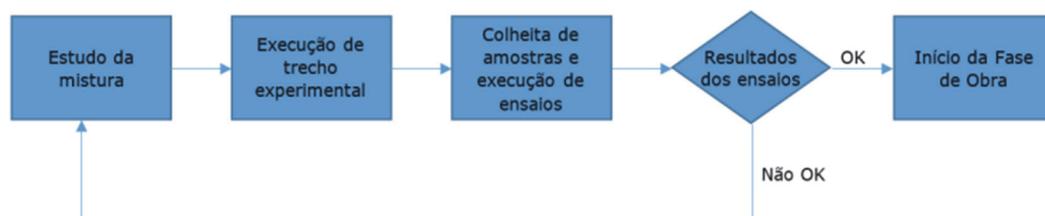


Fig. 7 – Metodologia para a definição da mistura de solo-cimento a aplicar em obra (Fernandes et al., 2016).

3 – INOVAÇÃO NA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

3.1 – Desafios

De acordo com a agenda 2030 das Nações Unidas (ONU), os sistemas de transporte precisam de ser melhorados para garantir que sejam mais seguros, acessíveis, sustentáveis e contribuir para a segurança rodoviária. Por todo o mundo, as estradas são as vias de comunicação essenciais para transportar pessoas, bens e serviços. O trabalho para construir e manter esta vasta rede de sistemas de transporte é tão crítico quanto desafiante. As empresas de construção trabalham por vezes em condições muito difíceis para construir ou manter as estradas. Mas gerir este trabalho pode ser muito complexo já que estes processos envolvem grandes equipas, normalmente dispersas, que precisam de elevada coordenação e de dados que se encontram frequentemente fragmentados ou são mesmo inexistentes. Como resultado, as obras são frequentemente atrasadas, ficam acima do orçamento ou são pouco eficientes.

Nos grandes projetos de construção, os custos operacionais do equipamento representam, em média, mais de 30% do orçamento do projeto e, muitas vezes, são uma das principais causas de derrapagens dos orçamentos no setor da construção. Em grande medida, estas derrapagens são o resultado de sistemas de controlo obsoletos que não fornecem relatórios precisos e abrangentes em tempo real, sobre o desempenho e a utilização dos recursos afetos a cada atividade durante o ciclo de vida do projeto. Por outro lado, não se está a fazer bom uso de dados que estão a ser acumulados e que podem, no futuro, ter enorme valor económico.

3.2 – Desenvolvimentos com aplicação às terraplenagens

3.2.1 – Sistemas de apoio à decisão

Tipicamente, os processos de terraplenagem são caracterizados por elevados níveis de incerteza e, subsequentemente, pela necessidade de existir flexibilidade suficiente por parte das equipas de planeamento e de gestão para lidar com imprevistos de natureza diversa, podendo ser tão variados

como alterações desfavoráveis das condições atmosféricas a avarias de equipamentos. Na maior parte dos projetos de construção que abrangem terraplenagens, a capacidade de criar um plano robusto e flexível suficiente para permitir ajustes como resposta a eventos imprevisíveis é proporcional à experiência das equipas de planeamento e gestão. No entanto, tendo em conta que esta experiência nem sempre está facilmente acessível, a importância do apoio à decisão é enfatizada. De facto, uma das vantagens dos sistemas de apoio à decisão é a capacidade de compilar e estruturar o conhecimento e experiência proveniente de obras anteriores, seja por meio do conhecimento adquirido por peritos e guias/normas, seja com recurso à análise de bases de dados de obras passadas (i.e., *Machine Learning*). Para além disso, o fato de facilitarem o contacto/colaboração entre várias especialidades e equipas (e.g., gestão de equipamentos, orçamentação, planeamento) ao longo de todas as fases do ciclo de vida de projetos de construção (e.g., concurso, projeto e planeamento, construção) vai de encontro a conceitos tais como Construção 4.0 e *Building Information Modelling* (BIM), cujo impacto positivo no setor tem sido comprovado recorrentemente nos últimos anos.

No caso específico das terraplenagens, o apoio à decisão é geralmente procurado no sentido de prever (e.g., comportamento dos geomateriais, segurança de taludes, produtividade de equipamentos em função de condições de trabalho) (Marques et al., 2008; Parente et al., 2014; Tinoco et al., 2017), monitorizar (e.g., posição de equipamentos de transporte, tempos de inatividade, avarias mecânicas) (Parente et al., 2018), otimizar (e.g., distribuição de volume de geomateriais entre frentes de escavação e aterro, minimização de distâncias de transporte, alocação ótima de recursos mecânicos) (Parente et al., 2015; Parente et al., 2022), ou combinações dos anteriores. Baseando-se em tecnologias como a inteligência artificial, simulação, algoritmos de otimização e sensorização, estes sistemas podem ser divididos de acordo com a metodologia adotada e os objetivos do apoio à decisão. Por um lado, tem-se o apoio ao planeamento, tipicamente baseado em sistemas de previsão ou de otimização robusta, cuja postura é a de criar planos robustos que não só abarquem os trabalhos previsíveis a realizar, mas também incluam planos de contingência para potenciais situações disruptivas. Por outro lado, tem-se o apoio à construção, por sua vez focados em sistemas de monitorização e otimização reativa, que preconizam a máxima flexibilidade no que concerne ao ajuste constante do planeamento inicial em resposta a ambientes mais voláteis ou à possibilidade de ocorrências imprevisíveis.

As subseções 3.2.2 e 3.2.3 apresentam um exemplo ilustrativo do potencial deste tipo de sistemas em fases de planeamento e construção, respetivamente, adotando como referência um caso de estudo real associado às fases de terraplenagem de uma obra de construção rodoviária em Portugal. A obra consistiu em 24 frentes de construção de aterro, que foram alimentadas por 15 frentes de escavação. O volume total de geomaterial processado foi aproximadamente 1500000 m³ ao longo de uma extensão aproximada de 20 km de trecho de autoestrada, sendo a previsão da duração média estimada dos trabalhos de cerca de 6 meses. A frota de equipamentos contou com um total de 6 cilindros compactadores, 14 equipamentos de espalhamento, 29 escavadoras e 39 camiões de transporte de geomateriais. Para obter os resultados apresentados, procedeu-se a uma simulação de condições de obra próximas das reais, utilizando como recursos disponíveis apenas os acima mencionados para desenvolver os trabalhos de acordo com as práticas já usualmente utilizadas na indústria. A metodologia adotada baseou-se no trabalho desenvolvido por Gomes Correia e Magnan (2012) e Parente et al. (2022), tendo como objetivo encontrar as soluções ótimas de alocação da frota de equipamentos pelas frentes de trabalho e ao longo do tempo, minimizando simultaneamente custos e duração de execução da obra (otimização multiobjetivo).

3.2.2 – Planeamento de um caso de obra

Como mencionado anteriormente, o propósito desta simulação de obra foi criar a oportunidade de demonstrar as potencialidades destas tecnologias para a alocação ótima da frota de equipamentos. Naturalmente, tendo em conta a natureza dinâmica do problema, que corresponde a uma série de

frentes de obra (i.e., escavações e aterros) que devem ser concluídas sucessivamente (mas não necessariamente sequencialmente), a solução adotada tem também de ser de natureza dinâmica. Por outras palavras, durante a obra existem várias equipas de escavação e de compactação cujo trabalho nas frentes respetivas irá ser concluído em alturas diferentes. Quando o trabalho numa frente é concluído, existe uma equipa (de escavação ou de compactação, dependendo da frente) cuja atividade deve continuar noutra local (i.e., iniciando-se outra “fase de trabalho”). No entanto, tendo em conta que as condições de trabalho nesta fase já não são as mesmas comparativamente às condições existentes na fase de trabalho anterior (i.e., as distâncias de transporte serão eventualmente diferentes, assim como os tipos de geomaterial nas novas frentes de escavação/compactação e até o espaço disponível na frente de trabalho), justifica-se que, em cada nova fase de trabalho, seja revista a alocação das equipas ativas para garantir que a alocação continua a ser ótima em termos globais do projeto. Assim, procura-se constantemente garantir que os trabalhos procedem de maneira ótima em função da minimização do custo e da duração global da obra, em oposição a uma otimização local que só se referiria à fase de trabalho atual.

Para atingir estes objetivos, o sistema solicita informação/*inputs* relativos a:

- Recursos mecânicos disponíveis, incluindo cilindros compactadores, espalhadores (e.g., bulldozers, motoniveladoras), escavadoras e camiões de transporte, assim como uma série de especificações dos mesmos (e.g., no caso dos camiões de transporte é solicitado o modelo, a capacidade de carga, e os custos associados à sua utilização e aluguer, se aplicável), como exemplificado na Figura 8a.
- Trabalho a desenvolver, nomeadamente no que concerne às frentes de escavação e de aterro, assim como a sua localização, o tipo e volume de geomaterial associado, o número máximo de equipamentos que pode estar ativo na frente em simultâneo e, finalmente, as distâncias entre frentes de escavação e de aterro (Figura 8b).

Com acesso a estes dados, o algoritmo de otimização que gere o sistema, baseado num *non-dominated sorting genetic algorithm II* (NSGA-II) (Deb et al., 2002), é capaz de procurar a melhor solução de alocação de recursos ao longo de todo o desenvolvimento da obra. De notar que este cálculo pode incluir a minimização das distâncias de transporte entre frentes de escavação e aterro e respetivos volumes, ou esta pode ser definida diretamente pelo utilizador (e.g., com base num diagrama de Brückner previamente determinado pelo equipa de projeto/planeamento). Tendo em conta que este processo se refere a uma otimização multiobjetivo, cuja duração aproximada foi de 3 horas, as soluções encontradas são apresentadas em formato de Pareto. Numa frente de Pareto, uma solução é considerada ótima (ou não-dominada) se nenhum dos objetivos de minimização puder ser melhorado sem piorar o outro. Por outras palavras, as soluções apresentadas e ilustradas na Figura 9 (cada ponto corresponde a uma alocação de equipamentos, avaliada pelo sua duração e custo associados) correspondem a *trade-offs* ótimos entre tempo e custo (i.e., sendo objetivos conflituosos, as soluções mais rápidas corresponderão também a custos superiores, e vice-versa). A apresentação dos resultados neste formato fornece uma maior flexibilidade no contexto do apoio à decisão, permitindo à equipa de planeamento a análise de vários cenários possíveis e a escolha do melhor em função do tempo, custo e da própria alocação, que pode ser consultada para cada solução. Esta consulta pode ser feita em vários formatos, sendo dois dos mais intuitivos o formato *spreadsheet* (i.e., em que cada linha corresponde a informação cronológica de cada equipamento referente à sua localização na frente de trabalho a que foi alocado em cada instante da obra), ou o formato de mapa, como exemplificado na Figura 10 para a solução “S6”, permitindo uma visualização no espaço dos equipamentos alocados em cada frente e para cada fase de trabalho.



a)



b)

Fig. 8 – Inputs do sistema: a) recursos disponíveis; b) frentes de trabalho.

3.2.3 – Aplicação à fase de construção

A presente simulação assumiu que, durante a fase de construção, existe a integração de sensores de posicionamento GPS nos camiões de transporte, o que permite aferir o número de ciclos realizados por cada camião num determinado espaço de tempo, dando assim indicação da produtividade dos mesmos em termos de volume transportado (tendo em conta uma capacidade média de volume de material transportado). Seguindo esta lógica, torna-se possível aferir igualmente a produtividade das equipas de escavação às quais os equipamentos de transporte estão associados durante o ciclo de carga, assim como a das equipas de compactação que recebem material durante o ciclo de descarga. Deste modo, é possível obter algum nível de monitorização de todos os equipamentos ativos com um custo e uma intervenção mínima apenas nas equipas de transporte (instalação de GPS em cada camião).



Fig. 9 – *Output* do sistema em fase de planeamento, em forma de frente de Pareto de soluções ótimas.



Fig. 10 – Exemplo ilustrativo de um dos tipos de visualização da alocação correspondente à solução “S6”.

Apesar da produtividade aferida nas fases iniciais ser meramente indicativa, uma vez que se está a assumir que os equipamentos de transporte são carregados a 100% da sua capacidade, o valor da produtividade é corrigido mensalmente no seguimento da realização de medições de topografia em cada frente de trabalho. Estas medições fazem já parte do processo normal de desenvolvimento de obras de terraplenagens para controlo de qualidade regular, pelo que não está a ser inserida disrupção

no andamento usual dos trabalhos. Ao ter uma noção exata das quantidades de volume de geomaterial escavado e aterrado como resultado destas medições de topografia, estes valores podem ser comparados aos estimados pelo sistema, que é determinado pela capacidade dos camiões e o número de ciclos. Assim, para corrigir o fato da carga média transportada dos camiões poder ser diferente da máxima, a produtividade dos camiões é afetada um fator corretivo, k (equiparável ao fator de eficiência usado nos cilindros de compactação), proporcional à razão entre os volumes reais de geomaterial processado, resultante das medições topográficas, e o valor estimado pelo sistema através do número de ciclos de carga/descarga realizados.

Neste contexto, a partir do momento em que a fase de construção se inicia, o sistema passa automaticamente a iniciar-se em modo de monitorização e controlo. A Figura 11 ilustra o funcionamento normal do *dashboard* de controlo, onde se pode monitorizar o desenvolvimento geral da obra, a produtividade aferida por frente de trabalho ativa (personalizável pelo utilizador), a posição dos equipamentos de transporte em tempo real por visualização do mapa e ainda ter acesso a uma série de notificações relativas a potenciais problemas que possam justificar a intervenção do utilizador (e.g., equipamentos com produtividade mais baixa do que esperado, camiões fora da rota planeada, equipamentos parados/inativos, entre outros). Este *dashboard* permite também aceder a qualquer momento ao histórico de atividades, assim como à função de edição dos parâmetros e características da obra. Esta última função é a que permite executar variadas correções ou ajustes ao planeamento, tais como o fato de alguns equipamentos poderem deixar de estar disponíveis por motivo de avaria, alterações aos tipos de geomateriais nas frentes que podem ser diferentes dos esperados após estudo geotécnico, ou a correção aos volumes e produtividades dos equipamentos associados resultante das medições topográficas mensais acima mencionada. Dependendo da sua magnitude, qualquer alteração efetuada induz o sistema a recalcular os custos e a duração em cada fase subsequente para as novas condições de trabalho, dando ao utilizador a alternativa de continuar com o planeamento atual, aceitando as novas previsões de custo e duração, ou solicitar ao sistema uma realocação dos recursos de modo a garantir que os trabalhos procedem de modo ótimo, conforme se exemplifica na Figura 12.

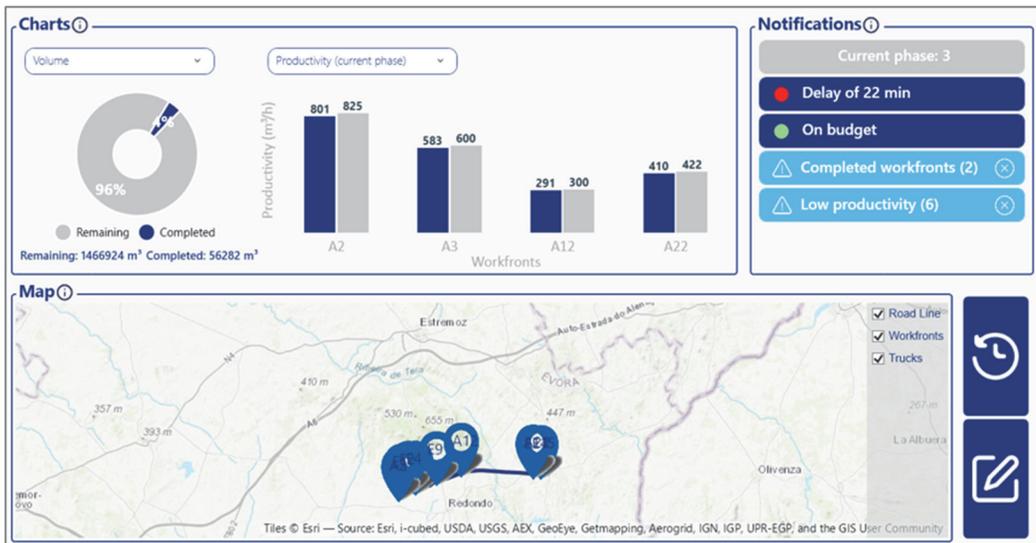


Fig. 11 – *Dashboard* de monitorização e controlo para a simulação de obra realizada.



Fig. 12 – Tabela relatório resultante da alteração dos volumes de uma frente e das produtividades dos camiões associados em conformidade resultante de uma medição topográfica (disparidade de volumes de cerca de 9% numa frente de compactação).

No caso em que o utilizador opte por proceder à re-otimização da alocação dos recursos ativos no seguimento da avaria de um equipamento de transporte durante a fase de trabalhos 18 do planeamento original, a frente de Pareto atingida pelo sistema para as novas condições de otimização seria ajustada. Uma vez que a re-otimização foi realizada já na fase 18, existem consideravelmente menos trabalhos a realizar para que sejam atingidos os objetivos de conclusão do projeto, pelo que o tempo de cálculo foi consideravelmente menor (~1h). Mais uma vez, as potenciais soluções estão avaliadas pelos objetivos de minimização. Porém, a função de re-otimização acrescenta um terceiro objetivo de minimização ao processo de otimização multiobjectivo, correspondente ao RAD (*Re-Allocation Disruption*), representado por um valor associado a cada uma das soluções representadas na Figura 12. Este terceiro objetivo prende-se com o “custo” de realocar qualquer tipo de equipamento para uma frente diferente durante a fase de construção. Por outras palavras, o valor do RAD aumenta linearmente com o número de alterações de equipamentos de uma frente de trabalho para outra como consequência da redistribuição efetuada por parte do algoritmo durante a re-otimização. Assim, ao adotar o RAD como terceiro objetivo de minimização, também é otimizado o tempo associado à reorganização da frota de equipamentos durante a fase de construção, reduzindo a “disrupção” em obra resultante de alterar vários equipamentos para outra frente de trabalho em simultâneo. O valor do RAD permite à equipa ou utilizador um fator adicional de apoio à decisão tendo em conta este aspeto, podendo ser útil ao comparar potenciais soluções de mérito semelhante, por exemplo.

À semelhança das soluções anteriores, é possível aceder à visualização das alocações correspondentes a cada solução. Note-se que, por meio do processo de otimização, o sistema acaba por levar a cabo não só a função de alocação dos recursos disponíveis, mas também a de seleção da frota ótima, evitando utilizar recursos que possam ser antes utilizados para outras atividades ou obras. Isto é especialmente relevante ao selecionar a função de re-otimização nas fases finais da obra, uma vez que a menor quantidade de trabalhos restantes para a conclusão da obra poderá não justificar a alocação de todos os recursos disponíveis naquele momento.

Finalmente, um último aspeto relevante está relacionado com a nomenclatura das soluções na re-otimização. Neste exemplo, a nova solução selecionada foi a “S6.3”, correspondendo à ligação do nome da solução inicial escolhida (S6) com a solução 3 da re-otimização, facilitando a leitura do histórico de soluções adotadas e respetivos ajustes ao longo da obra, tal como ilustrado na Figura

13. Para além de disponibilizar toda a informação referente às soluções e ajustes ao longo do projeto, o histórico permite também observar todas as notificações que surgiram durante a obra e até a produtividade individual de cada equipamento sensorizado ao longo do tempo (neste caso, apenas dos equipamentos de transporte). Como resultado, é criada uma base de dados descritiva da obra e do desenvolvimento dos trabalhos, permitindo análises futuras de natureza variada, tais como auditorias, análises estatísticas, ou aplicações de inteligência artificial capazes de extrair conhecimento de bases de dados ricas em informação.



Fig. 13 – Histórico das soluções adotadas, acessado no final da conclusão da simulação.

3.3 – Desenvolvimentos com aplicação aos pavimentos

3.3.1 – A digitalização do processo de pavimentação

A construção é ainda vista como uma atividade conservadora e a pavimentação não é exceção. Se a construção, em geral, começa a adotar tecnologias digitais, a pavimentação está ainda mais longe disso. A maior parte dos processos continuam atualmente a ser geridos como no passado: comunicação pouco eficiente, falta de registo sistemático de informações, falta de informação e processos colaborativos, utilização de máquinas não digitais ou conectadas, dificuldades de interrelacionar várias especialidades, áreas ou empreitadas. Embora sejam visíveis alguns indícios de evolução nos índices de digitalização nas grandes empresas de construção, na esmagadora maioria do setor da construção, representado por empresas de pequena e média dimensão, ainda não se observam sinais de evolução relevantes ou que sejam úteis para os desafios de competitividade e sustentabilidade que já se encontram na ordem do dia e que são prementes.

É por isso absolutamente necessário criar condições que permitam, qualquer empresa ou agente do setor da construção, darem passos rumo à digitalização dos seus processos construtivos de uma forma que seja: 1) comportável economicamente; 2) sustentável ambientalmente; e 3) realizável do ponto de vista de fatores humanos.

Focando a discussão na problemática dos pavimentos rodoviários, o equipamento associado acaba por ter um dos papéis mais relevantes na produção de dados necessária à digitalização. Este equipamento, embora na maioria dos casos funcionais na sua função primária, refere-se a máquinas por vezes com dezenas de anos e sem qualquer capacidade digital: sem sensores, não conectadas, sem interfaces de comunicação, sem software ou interfaces de controlo orientadas à eficiência da

sua operação. A solução mais imediata seria a renovação destas máquinas para modelos mais modernos que existem já com todo o tipo de funcionalidades possíveis e que colmatam quase todas as lacunas: descartar e comprar novas máquinas. Contudo, do ponto de vista económico, faltam à maioria das empresas de pequena e média dimensão (a esmagadora maioria do setor) as capacidades económicas para o fazer. Por outro lado, as máquinas existentes cumprem com a sua função primária: transportar, espalhar, compactar, etc., e, por isso, não existem vantagens óbvias aos decisores em descartá-las para efetuarem novas aquisições. Há também a questão ambiental associada no que diz respeito ao fim-de-vida destas máquinas com uma enorme pegada ambiental associada. Torna-se por isso necessário oferecer soluções ao setor para um problema de praticidade que existe na digitalização deste tipo de processos.

Uma potencial solução é a conversão, a melhoria ou a beneficiação destes equipamentos já existentes, num esforço intitulado de *retrofit*. Uma abordagem típica passa por sensorizar as máquinas, ligar estes sensores a uma unidade de processamento, processar localmente alguma desta informação para dar suporte ao operador e transmitir todos os dados para uma nuvem de forma a garantir os benefícios do uso dos mesmos de uma forma central e coordenada. A título exemplificativo, na Figura 14 pode observar-se a realização de uma experiência, integrada no projeto REV@Construction, relativa à introdução de um sistema de aquisição da temperatura do pavimento numa pavimentadora que não dispunha dessa tecnologia. Neste caso, poder-se-á dizer que esta máquina beneficiou de um *retrofit* para dispor de uma funcionalidade muito útil para o processo, quer na operação quer no controlo de qualidade, e que se evitou assim a necessidade de a substituir com todo o impacto económico e ambiental associado. Com este *retrofit*, a mesma máquina tornou-se digital e, portanto, mais útil e eficiente. Existem já várias soluções no mercado deste tipo e projetos de investigação como é exemplo um projeto de digitalização de camiões de transporte de terras onde se criou uma solução de *hardware* agnóstica ao fabricante que transforma camiões tradicionais em camiões conectados e sensorizados (Pereira et al., 2022).



Fig. 14 – Experiências de incorporação de uma câmara térmica em pavimentadora.

No que concerne ao pavimento em si, os desafios da digitalização prendem-se tipicamente com a adoção de sistemas de monitorização do estado de conservação dos pavimentos (Amândio et al., 2021). Devido à inerente dimensão das redes de estradas, que são normalmente bastante extensas, há por isso desafios muito significativos em conseguir assegurar a sua monitorização em toda a extensão. Atualmente, grande parte dos sistemas está desenhado para processos de inspeção periódica, o que faz com que exista pouca informação sobre os pavimentos e, conseqüentemente, os

custos de conservação sejam maiores e as interrupções de tráfego aconteçam com mais frequência. As abordagens ao problema têm incidido essencialmente em monitorizar, por amostragem, determinados troços das vias utilizando sensores fixos (como fibras óticas, por exemplo) ou através de veículos ou meios móveis que percorrem as mesmas utilizando tecnologias como a visão computacional, LIDAR ou mesmo georadar. Existem por isso essencialmente dois tipos de monitorização do pavimento: monitorização dinâmica e monitorização estática. A escolha do tipo mais adequado depende de vários fatores como o tipo de análise a realizar ou o tipo de pavimento (Shtayat et al., 2020).

A digitalização do processo de pavimentação é geradora de um volume significativo de dados cuja gestão representa um enorme desafio. A indústria da construção em geral já lida com grandes volumes de dados heterogéneos, que deverá aumentar exponencialmente à medida que tecnologias como as redes de sensores e a Internet das Coisas se tornem cada vez mais utilizadas e úteis para os esforços de digitalização (Bilal et al., 2016). Quando o volume de dados é pequeno, o tipo de ilações a tomar é relativamente evidente, fazendo com que estes dados sejam tipicamente apenas instrumentais para as aplicações que os gerem como é o caso da geolocalização de máquinas, o consumo de combustível ou o registo de produtividade. Pode ser disso exemplo, um empreiteiro geral que rastreia onde estão as suas máquinas, calcula consumos e verifica se os seus trabalhadores ou atividades estão a ser eficientes. Contudo, quando o volume e diversidade de dados começa a avolumar, para além do referido, surgem outras possibilidades e pode passar a falar-se em *Big Data* e as possíveis aplicações. Muitas vezes habilitadas por inteligência computacional, estas aplicações elevam as empresas a um novo patamar de eficiência e de competitividade. Para se considerar um volume de dados como *Big Data* são necessárias enormes quantidades de informação armazenadas em sistemas baseados em nuvem que pessoas selecionadas podem aceder de qualquer local a qualquer momento: trabalhadores, informáticos, subcontratados e até pessoas com perfil administrativo (Vasenev et al., 2014). Estes dados podem vir de sensores, pessoas (pessoas como sensores), computadores, *smartphones*, *tablets*, outros *softwares* e muitas outras fontes de dados.

O volume muito significativo de dados pode representar vários tipos de desafios para a organização ou para a utilidade na sua utilização:

- Qualidade dos dados – Nem todos os sensores têm o desempenho que deviam pela folha de características do fabricante e, frequentemente, requerem calibração e nem todas as informações são bem registadas ou até nem sempre o seu contexto temporal ou espacial está correto. Dispor de dados pouco precisos ou errados pode induzir em erro e comprometer a operação ou o planeamento. A vulgarização da Internet das Coisas com sensores de baixo custo contribui de forma preocupante para este fenómeno. Para se poderem utilizar os dados com confiança, é preciso garantir a consistência dos mesmos através de sensores de qualidade, procedimentos cuidadosos e utilizar fontes de dados fidedignas.
- Armazenamento e processamento dos dados – A produção de um volume significativo de dados tem um custo de armazenamento e processamento dos dados que não é desprezável. Esse custo é ainda maior quando se considera a devida redundância que deve ser assegurada para os mesmos. Práticas de compactação e de reciclagem de dados podem ser necessárias para a sustentabilidade de um uso intensivo de dados.
- Anonimização – O regulamento geral de proteção de dados obriga a ter cuidados especiais na forma como se gerem dados. Numa utilização tão massiva de dados de tantas fontes e em tão grande quantidade, é relativamente fácil cometer erros que levem ao não cumprimento deste regulamento, com implicações sérias para as organizações. Por isso, práticas como a anonimização de dados devem ser levadas muito a sério.
- Valorizar dados – Acumular dados em grande quantidade pode, só por si, representar um investimento futuro mesmo que no presente ainda não haja forma de os utilizar em tempo real ou até valorizar em aplicações de inteligência computacional. Contudo, o setor da

construção, face à premente necessidade de melhorar a sua eficiência, deve, desde já, utilizar aplicações que beneficiem destes dados para influenciar as suas decisões de planeamento e operação. Em pavimentos, por exemplo, poder-se-á utilizar dados históricos do processo de pavimentação para que, em conjunto com informação de monitorização de patologias de pavimento, se possam tomar elações futuras sobre a relação entre o processo e a ocorrência de patologias e evitar assim os mesmos erros no futuro. Um exemplo disso é o sub-projeto PAV4.0 integrado no projeto REV@Construction, atualmente em desenvolvimento, que se ilustra de seguida.

3.3.2 – *Exemplo de aplicação*

O Projeto Mobilizador “Digital Construction Revolution – REV@CONSTRUCTION”, que tem como princípio base a concretização da Transformação Digital das empresas do setor AEC, tem um subprojecto denominado PAV4.0.

O objetivo do PAV4.0 é o desenvolvimento de uma solução digital única que permita que toda a execução da pavimentação seja monitorizada e controlada em tempo real, aproveitando ao máximo as oportunidades de digitalização e, dessa forma, permitir ganhos de eficiência, acelerando a recolha, a compilação e o tratamento dos dados em tempo real extraídos de forma automática de sistemas de sensorização nos equipamentos e mão-de-obra no local.

Os sistemas de gestão de pavimentos são uma ferramenta essencial para qualquer gestor de infraestruturas:

1. Recolha em tempo real dos dados gerados pela instrumentação de monitorização instalada nos equipamentos e/ou equipas de produção.
2. Processamento e compilação dos dados recebidos pelo sistema numa base de dados uniformizada traduzindo os dados em informação útil, tal como a produtividade atual das equipas de produção e custos associados.
3. A informação decorrente dos passos anteriores é utilizada pelo sistema para apresentar informações ao utilizador que suportarão a decisão de planeamento e operação do processo de pavimentação.
4. Todos os dados gerados são acumulados em base de dados de forma a permitir o uso de metodologias de inteligência computacional que permitirão retirar futuras elações do processo e otimizar ainda mais o processo de pavimentação.

Na Figura 15 é possível observar o esquema funcional do projeto PAV4.0 e os vários atores envolvidos no processo de pavimentação, que começa na central de misturas betuminosas (alvo também de um “retrofit”) e acaba na pavimentação com a digitalização da espalhadora e dos cilindros compactadores. O projeto captura e acumula informações como a geolocalização dos equipamentos, várias informações da central de produção de misturas betuminosas (temperatura, volume, fórmula, tipo de agregados, etc.), condições meteorológicas no local da pavimentação, temperatura de aplicação ou até o mapa das intervenções por tipo e segmentadas por marcas quilométricas.

Como referido anteriormente, um dos desafios de digitalizar um processo de pavimentação é conseguir converter as máquinas menos atuais em máquinas geo-localizadas, sensorizadas e conectadas, conforme ilustrado na subseção 3.3.1. Exemplo disso é o subprojeto PAV4.0 onde se verificou ser necessário colher dados relativos ao processo de pavimentação. Neste exemplo específico, foi a temperatura de aplicação da mistura betuminosa no pavimento. O processo de pavimentação requer que a mistura seja aplicada numa gama muito específica de temperatura, centrada em torno dos 150°C, para assegurar que o pavimento possa ser compactado convenientemente e assegurar os níveis de qualidade desejáveis. Esta medição precisa da temperatura, que seria tipicamente assegurada por pavimentadoras recentes de topo de gama, não está presente na esmagadora maioria dos equipamentos utilizados no setor. Por isso mesmo, no

âmbito do PAV4.0 foi criado um dispositivo que faz “retrofit” a cada pavimentadora para lhe providenciar estas características.

Este dispositivo, retratado na Figura 16, é composto por uma câmara de infravermelhos de 16x16 pixels de resolução, um GPS RTK de elevada resolução espacial, um módulo de Wi-Fi e microcontroladores diversos, para providenciar uma medição precisa de uma linha de 16 pontos de medição de temperatura agrupando em 4 zonas de temperatura média, com uma montagem na pavimentadora conforme se ilustra na Figura 17.

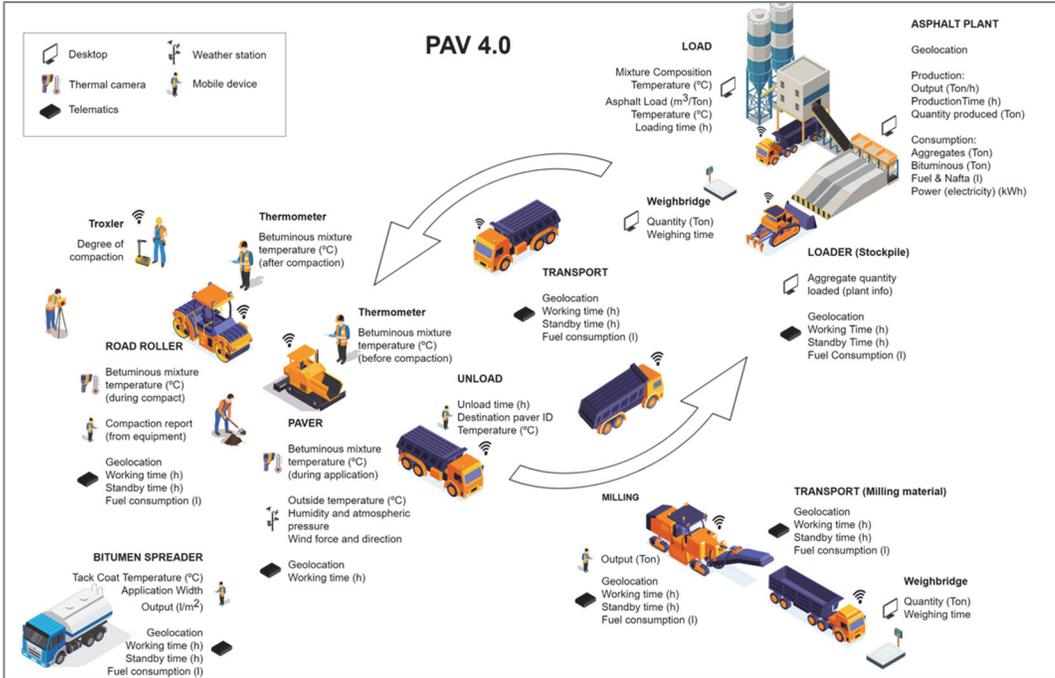


Fig. 15 – Esquema ilustrativo do projeto PAV4.0.



Fig. 16 – Protótipo do sensor de temperatura do pavimento.



Fig. 17 – Ilustração do protótipo da instalação do sensor de temperatura numa pavimentadora.

Com este dispositivo passa então a ser possível gravar 4 valores de temperatura do pavimento (aquando da pavimentação) por cada 40 a 50 cm de extensão pavimentada. Os dados são então enviados por Wi-Fi (dependendo do que estiver disponível como opção de ligação à internet) para uma infraestrutura própria que irá armazenar os dados e disponibilizar na aplicação PAV4.0, ilustrada na Figura 18, desenvolvida em ambiente *web* para permitir o seu uso em todo o tipo de dispositivos de forma ubíqua e pervasiva e que funciona de interface para todo o tipo de utilizadores com diferentes papéis e responsabilidades.

Conforme já referido, todos os dados capturados irão permitir monitorizar o processo em tempo real para efeitos de operação e controlo de qualidade. Contudo, uma das mais-valias desta solução é permitir realizar análise avançada de dados utilizando inteligência computacional e ciência de dados e, por exemplo, correlacionar a ocorrência de patologias de pavimento (que possam estar associadas à temperatura de aplicação da mistura betuminosa, ou a outras variáveis também gravadas no processo como a temperatura, humidade e outras). Como se percebe, por este caso de aplicação, as oportunidades da digitalização para o processo de pavimentação são imensas e variadas.

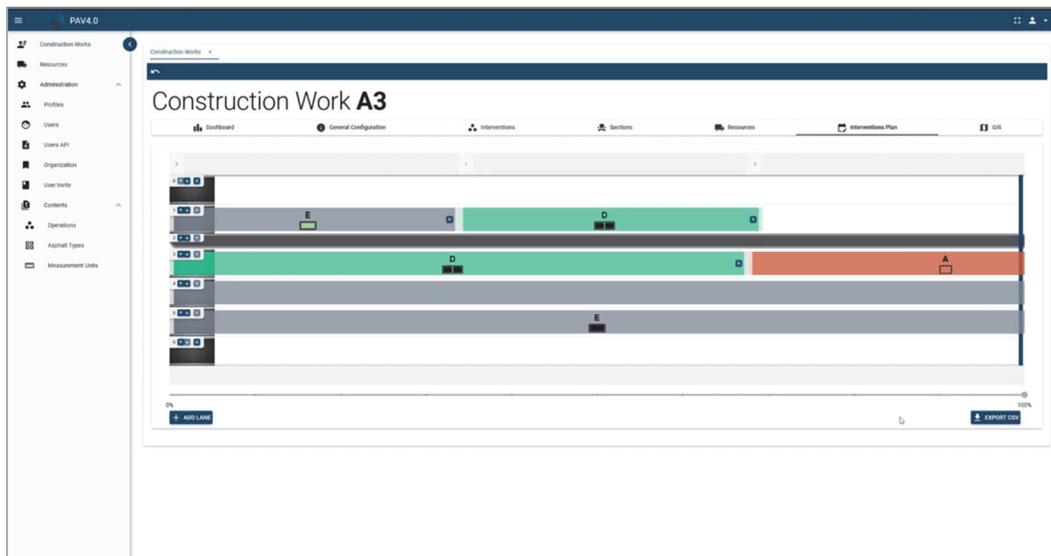


Fig. 18 – Ilustração de um ecrã da aplicação web PAV 4.0.

3.4 – Morfologia das partículas de agregado de balastro com aplicação à via-férrea

3.4.1 – Desenvolvimento de técnicas de digitalização

No âmbito da geotecnia nos transportes aplicada à ferrovia têm-se verificado vários desenvolvimentos e aplicações práticas de integração de novas tecnologias, desde a utilização de metodologias BIM, por exemplo na integração de diferentes sistemas das infraestruturas de transporte, e da utilização de *Digital Twins* no apoio ao faseamento construtivo, passando pela sensorização, aquisição e processamento de *Big Data*, recorrendo a ferramentas de Inteligência Artificial, ou ainda à construção e análise detalhada de modelos construídos com base em técnicas de radiometria.

Nesta secção são apresentadas, em linhas gerais, alguns estudos de aplicações de tecnologias de digitalização para a análise da morfologia de partículas de balastro ferroviário, recorrendo a técnicas de fotogrametria que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC, em colaboração com outras entidades.

A camada de balastro ferroviário é um dos principais componentes das vias-férrreas balastradas e, por esse motivo, este material é bastante controlado e deve obedecer a requisitos geométricos e mecânicos exigentes, estabelecidos em normativos específicos (CEN, 2002). Tradicionalmente, o balastro é constituído por agregado natural britado grosso, proveniente de rochas duras e sãs, cujas partículas apresentam dimensões entre 22 e 63 mm, e é colocado numa camada de cerca de 25-35 cm de espessura mínima, sob as travessas. Para uma maior estabilidade da camada e redução das forças de contato entre as partículas (através do aumento do número de pontos de contato), é desejável que as partículas tenham forma cúbica, faces rugosas e arestas vivas de forma a favorecer o imbricamento e evitar movimentos de rolamento ou de translação significativos. Neste contexto, a morfologia das partículas de balastro afeta especialmente o desempenho mecânico da camada, e da via-férrea como um todo, pelo que é importante caracterizá-la adequadamente e analisar os fatores que afetam a sua evolução, no que se refere ao desgaste e quebra das partículas (Guo et al., 2019).

Uma das principais linhas de investigação sobre a análise do ciclo de vida da via-férrea tem-se focado no estudo da influência da forma das partículas e dos parâmetros geométricos no comportamento da camada de balastro e na evolução da sua distribuição granulométrica (Tutumluer et al., 2006; Descantes et al., 2007; Indraratna et al., 2011; Le Pen et al., 2013; Moaveni et al., 2014; Nâlsund, 2014). Os recentes avanços computacionais, em termos de *hardware* e de ferramentas de simulação, têm promovido o desenvolvimento e a utilização mais frequente de modelos numéricos da via-férrea mais complexos, que recorrem, por exemplo, ao método de elementos discretos que exige um profundo conhecimento sobre a morfologia das partículas e da sua iteração. Com estas ferramentas numéricas é possível analisar em maior detalhe os efeitos do tráfego e das ações mecânicas de manutenção (ataque de via) na evolução da forma das partículas, a estabilidade da camada e o comportamento dinâmico da via (Huang e Chrismer, 2013; Saussine et al., 2013; Tutumluer et al., 2013; Voivret et al., 2013; Ahmed et al., 2016; Chen e McDowell, 2016; Xu et al., 2021). Para esse objetivo, têm-se recorrido a diferentes abordagens para avaliar a morfologia das partículas de balastro, que se têm mostrado mais ou menos adequadas para este fim.

Embora os procedimentos de caracterização da morfologia das partículas previstos nas regulamentações em vigor estejam bem estabelecidos, estas especificam abordagens empíricas antigas e medições manuais, portanto sujeitas a erro humano (Folk, 1955). Uma análise grosseira da morfologia das partículas pode comprometer a qualidade dos resultados e conclusões dos estudos. É neste aspeto que a transição para o digital tem contribuído significativamente nos últimos anos, não só no que se refere à automatização e aquisição dos dados, mas também nas técnicas de processamento e análise dos mesmos.

Embora tenha havido diversos desenvolvimentos no que se refere a técnicas de caracterização da morfologia das partículas de agregados aplicados em infraestruturas de transportes, utilizando ferramentas de processamento automático de imagem, muitos destes ou se limitam apenas a análises bidimensionais (Zhao et al., 2020), ou não permitem a caracterização de partículas de dimensão

semelhante à do balastro ferroviário (Gates et al., 2011), ou são excessivamente dispendiosas e de difícil utilização (Deiros et al., 2019). Guo et al. (2019) apresentam uma revisão de literatura sobre estas e outras técnicas, comparando e evidenciando as vantagens e limitações de cada uma.

3.4.2 – Avaliação e validação recorrendo à fotogrametria

Estudos recentes no LNEC têm permitido o desenvolvimento de ferramentas mais acessíveis e expeditas, em termos de custo de equipamento e de *software*, de conhecimento e experiência necessários, bem como de esforço de processamento computacional, visando a reconstrução tridimensional de modelos digitais de objetos e respetiva análise de morfologia. A metodologia de reconstrução tridimensional (3D) de partículas de balastro consiste num processo de digitalização baseado em fotogrametria de curto alcance mais eficiente e de menor custo do que outros disponíveis. Utiliza *software* de acesso livre para a aplicação de algoritmos de *MultiView* e *Structure-from-Motion* e para o manuseamento das malhas 3D, conforme apresentado em Paixão et al. (2018). Entre os exemplos da aplicação, salientam-se não só os estudos sobre a morfologia de partículas de rocha natural (Jerónimo et al., 2020; Paixão et al., 2018) e artificial (Paixão e Fortunato, 2021) para balastro ferroviário, mas também estudos mais recentes sobre a rugosidade de discontinuidades rochosas (Paixão et al., 2022).

Entre as possíveis aplicações deste tipo de ferramentas de geração de modelos 3D de partículas de agregados para infraestruturas de transportes, encontram-se, entre outros: a caracterização do tamanho e da forma para verificação da conformidade; o estudo da evolução da morfologia das partículas resultante do desgaste e/ou fragmentação; e a criação uma base de dados de partículas digitais para alimentar bibliotecas de partículas destinadas à modelação por elementos discretos.

Os estudos iniciais focaram-se na validação da metodologia de digitalização por fotogrametria através da comparação das malhas tridimensionais de partículas de balastro obtidas por essa abordagem com as malhas geradas através de métodos bem estabelecidos no meio técnico-científico, nomeadamente, a tecnologia *laser scanning*. Os resultados obtidos sobre uma amostra de balastro constituído por 18 partículas foram bastante satisfatórios, no sentido em que a qualidade das malhas digitais foi comparável à das obtidas por *laser scanning*. É de notar que os desvios entre as malhas obtidas pelos dois métodos situaram-se, quase totalmente, no intervalo de $\pm 0,3$ mm (Figura 19a).

Em comparação com um método padrão de *laser scanning*, a abordagem por fotogrametria requer alguns conhecimentos básicos de fotografia por parte do operador, mas é muito menos exigente em termos de competência técnica e de recursos do que, por exemplo, a digitalização por tomografia computadorizada. A sessão de fotografia e as etapas de processamento são propensas ao processamento em lote e em paralelo, permitindo um rendimento de cerca de 2 partículas por hora.

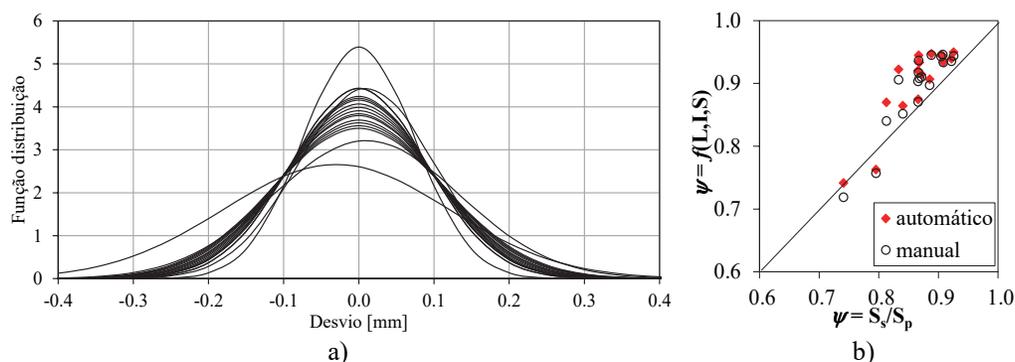


Fig. 19 – a) Curvas de distribuição dos desvios entre as malhas digitais de 18 partículas obtidas por fotogrametria e por *laser scanning*; b) esfericidade das partículas determinada de forma manual ou automática.

3.4.3 – Ferramentas de medição digital automática

No mesmo âmbito, foram desenvolvidas ferramentas de processamento e medição automática de vários parâmetros da morfologia das partículas, tais como, o volume, a área de superfície, as dimensões segundo os eixos maior (L), intermédio (I) e menor (S) (Krumbein, 1941), a esfericidade (Ψ), entre outros. Na Figura 19b é apresentada uma comparação entre os valores de esfericidade determinados segundo a expressão empírica formulada em função das dimensão L , I e S das partículas (Aschenbrenner, 1956), tal que $\Psi = f(L, I, S)$:

$$\Psi = \frac{12.8 \sqrt[3]{(S/I)^2(I/L)}}{1 + (S/I)(1 + (I/L)) + 6\sqrt{1 + (S/I)^2(1 + (I/L)^2)}} \quad (1)$$

e os determinados como a razão entre a área de uma esfera com volume idêntico ao da partícula (S_s) e a área da superfície dessa partícula (S_p) (Wadell, 1932): $\Psi = S_s/S_p$. É de notar que esta última formulação requer a determinação, não só da área da superfície da partícula, mas também do seu volume, que nesta era digital podem ser obtidos facilmente recorrendo às ferramentas tipicamente disponibilizadas por *software* de manuseamento de malhas 3D, mas em décadas anteriores seria de difícil determinação. Na Figura 19b são apresentados os valores determinados pela ferramenta de medição digital automática e os obtidos por medição “manual” dos parâmetros L , I e S , sobre as malhas digitais.

Estes resultados evidenciam não só que a medição manual pode introduzir erros apreciáveis, mas também que a determinação de parâmetros recorrendo a formulações empíricas (baseada em medições manuais que anteriormente eram possíveis e exequíveis, como L , I e S) e frequentemente utilizadas na classificação da morfologia de partículas (Blott e Pye, 2008), é muito redutora da tridimensionalidade das suas formas.

3.4.4 – Aplicação ao agregado de escória de siderurgia

Com o objetivo de analisar o desempenho e evidenciar as capacidades do agregado de escória de siderurgia (ASIC) como matéria-prima para balastro ferroviário e, assim, promover a incorporação deste subproduto da indústria e contribuir para o aumento da sustentabilidade do transporte ferroviário, no LNEC foi desenvolvido um estudo comparativo, com um agregado granítico natural, sobre a evolução da morfologia das partículas quando sujeitas ao ensaio de desgaste de Micro-Deval (ensaio a seco) (Paixão e Fortunato, 2021).

O estudo consistiu em submeter a ensaio uma amostra de cada um dos dois materiais, sendo que previamente se selecionou aleatoriamente um conjunto de 30 partículas de cada material. Recorrendo à metodologia de fotogrametria referida anteriormente, foram reconstruídas as malhas tridimensionais de cada uma dessas 60 partículas em três fases do ensaio: no início; após 2 mil revoluções do tambor; e no final do ensaio, após 14 mil revoluções.

Com as ferramentas de análise de morfologia desenvolvidas foi possível identificar, em cada partícula, as regiões de maior desgaste e/ou quebra e quantificar fisicamente essa evolução, conforme ilustrado na Figura 20. Foi também possível realizar um mapeamento dos valores do raio de aspereza (inverso da curvatura da superfície), tendo-se verificado uma boa correspondência entre esse parâmetro e o desgaste, tal como seria de esperar. Foram ainda aplicadas outras técnicas mais avançadas de análise morfológica que recorrem a funções harmónicas esféricas para caracterizar a evolução de parâmetros tridimensionais relativos à forma, à angularidade e à textura das partículas. Os resultados evidenciaram que as partículas de ASIC apresentaram maiores índices tridimensionais de angularidade e de textura superficial do que o granito natural, que são características desejáveis para agregado de balastro, no sentido de conferir resistência à camada e estabilidade à via-ferrea. As

partículas de ASIC retiveram essas características por mais tempo durante o ensaio e produziram desgaste superficial comparável ou inferior ao do granito.

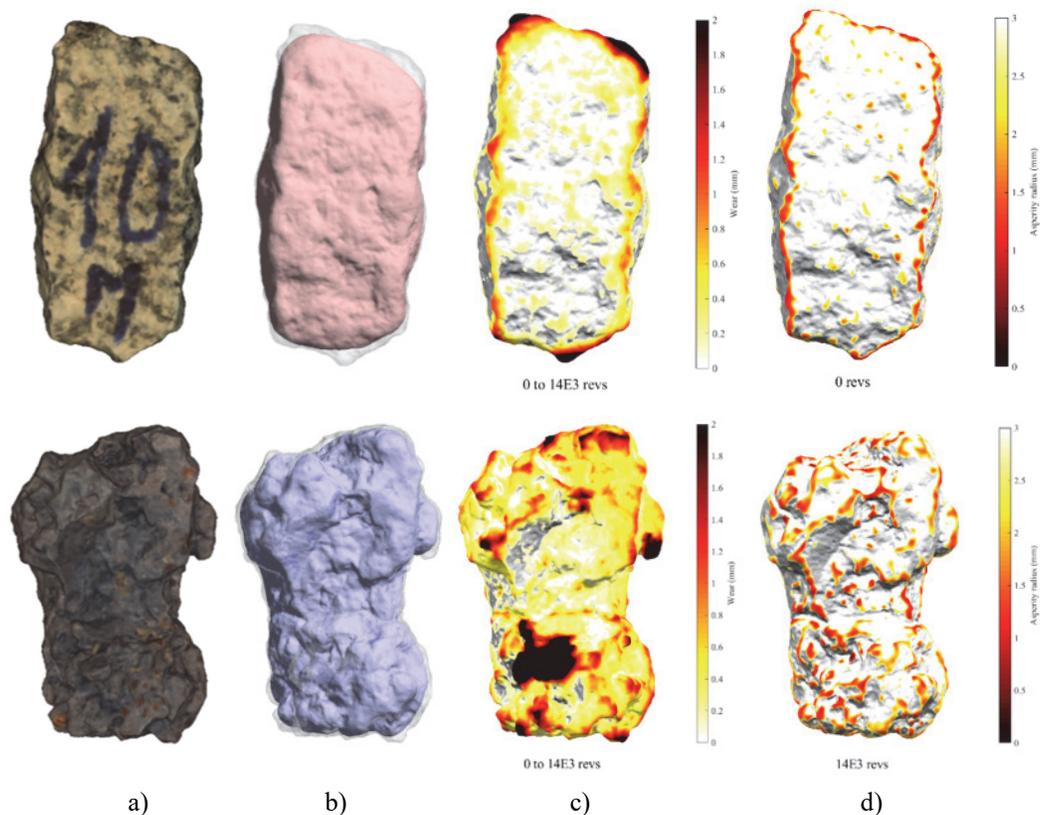


Fig. 20 – Resultados relativos a uma partícula de granito (em cima) e uma de ASIC (em baixo): a) aspeto da partícula; b) diferença entre o início e fim; c) desgaste superficial; d) raio de aspereza.

Estes resultados evidenciam o potencial que ASIC apresenta como um material alternativo de balastro, quando processados devidamente. Embora existam exemplos de aplicação deste material como balastro em alguns países, como no Brasil e nos E.U.A, a sua aplicação na Europa ainda está limitada. Assim, no atual paradigma de construção sustentável, considera-se oportuno desenvolver estudos envolvendo, por exemplo, a aplicação de ASIC em trechos experimentais de via-férrea, no sentido de demonstrar o desempenho deste material e consolidar a informação sobre o seu comportamento, eventualmente aplicando técnicas de caracterização baseadas em ferramentas digitais, como as aqui apresentadas.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) está cada vez mais comprometido com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas (ONU). O contexto da Indústria 4.0 tem promovido o desenvolvimento de técnicas inovadoras da ciência dos materiais e da era digital com aplicação no setor da construção e, em particular, das infraestruturas de transporte. Com este artigo pretendeu-se demonstrar, com exemplos de aplicação em Portugal no âmbito da transição verde e da transformação digital, que a geotecnia pode igualmente dar, a par de outras especialidades, um contributo ativo e efetivo para a sustentabilidade e resiliência do setor,

nas várias fases do ciclo de vida das obras, nomeadamente no âmbito da gestão dos geomateriais, das terraplenagens, dos pavimentos rodoviários e aeroportuários e das vias-férreas.

No âmbito da transição verde, o artigo apresentou a utilização de materiais não convencionais e renováveis e o recurso a técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em Portugal têm sido desenvolvidos importantes estudos sobre a aplicação de agregados reciclados em infraestrutura de transportes e que têm evidenciado o potencial de aplicação daquele tipo de agregados. As obras rodoviárias em curso no âmbito do PRR estão a ser exemplos dessa aplicação prática, nomeadamente de agregados reciclados de RCD, quer em misturas betuminosas quer em camadas granulares não ligadas (e.g., misturas betuminosas recuperadas), dando cumprimento ao Regime Geral de Gestão de Resíduos. O artigo descreveu também a utilização de excedentes industriais na estabilização de solos com uma significativa componente de cimentos alcalinos. Esta técnica de estabilização tem-se revelado bastante promissora não só para resolver o problema ambiental dos excedentes industriais, mas também pela possibilidade de substituir o cimento Portland de elevada pegada ecológica. Foi descrito um caso de estudo relacionado com a estabilização de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. A importância desta nova abordagem para uma maior sustentabilidade e resiliência tem sido assumida pelas principais entidades gestoras das redes de infraestruturas de transporte. O artigo descreveu exemplos demonstrativos da metodologia que a Infraestruturas de Portugal tem vindo a implementar nas suas obras, quer ao nível de projeto quer na fase de construção.

Relativamente à transformação digital, foram apresentados os mais recentes desenvolvimentos relacionados com aplicações às terraplenagens, pavimentação rodoviária e via-férrea. No caso das terraplenagens, foi dado destaque aos sistemas de apoio à decisão. Foi descrito um caso de obra que permitiu fazer a demonstração da vantagem de utilizar um algoritmo de otimização, ao nível de planeamento e construção, para procurar a melhor solução de alocação de recursos. Em relação à pavimentação rodoviária, foram apresentados casos de otimização de processos, sensorização e monitorização de equipamentos e recolha de informação, aproveitando ao máximo o potencial da digitalização e, conseqüentemente, permitindo ganhos de eficiência e qualidade. No âmbito da ferrovia, com o exemplo da fotogrametria aplicada à morfologia das partículas de balastro, foi mais uma vez demonstrada a vantagem de utilizar tecnologias de digitalização.

É muito importante que no futuro se continue a criar condições que permitam às empresas do setor da AEC promover ainda mais a digitalização dos seus processos, ao nível de planeamento, construção e gestão da operação, com todas as vantagens daí inerentes do ponto de vista económico, ambiental e societal. Acredita-se também que será cada vez maior a implementação de técnicas construtivas comprometidas com os ODS. Neste esforço coletivo de implementação da transição eco-digital nas infraestruturas de transportes, a geotecnia continuará a ter um papel fundamental.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seguidamente os seus agradecimentos pelos seguintes apoios recebidos no âmbito das várias matérias abordadas no presente artigo:

- Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento UIDB/04625/2020 do CERIS (José Neves).
- Projeto PTDC/ECM/100931/2008 (SUPREMA – Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias), financiado pela FCT, e do projeto be-READY (*REsilient roAD pavements for sustainabilITy*), financiado pela Islândia, Liechtenstein e Noruega através dos EEA Grants (Ana Cristina Freire, José Neves).
- Fundos Europeus Estruturais e de Investimento na componente FEDER, através do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do Programa Operacional Regional de Lisboa (ROP Lisboa) [Projeto n.º 046123; Referência do financiamento: POCI-01-0247-FEDER-046123 e LISBOA-01-0247-

FEDER-046123]. É também apoiado pelo programa de Recursos Humanos Altamente Qualificados [Referência de financiamento: NORTE-06-3559-FSE-000176] (João Moutinho, Manuel Parente).

- Siderurgia Nacional da Maia na disponibilização do material ASIC. O trabalho foi parcialmente financiado por Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e por Financiamento Programático – UIDP/04708/2020, da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) (André Paixão).
- Apoio parcial da FCT através de fundos nacionais (PIDDAC) sob a referência UIDB/04029/2020, e sob a referência LA/P/0112/2020 do Laboratório Associado "Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems" ARISE sob a referência LA/P/0112/2020 (António Gomes Correia).
- Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT), da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG)

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, S.; Harkness, J.; Le Pen, L.; Powrie, W.; Zervos, A. (2016). *Numerical modelling of railway ballast at the particle scale*. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 40 (5), pp. 713-737, <https://doi.org/10.1002/nag.2424>.

Amândio, M.; Parente, M., Neves, J.; Fonseca, P. (2021). *Integration of smart pavement data with decision support systems: A Systematic Review*. Buildings, 11 (12), 579. <https://doi.org/10.3390/buildings11120579>.

Antunes, V.; Freire, A. C.; Neves, J. (2019). *A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling*. Construction and Building Materials, 211, pp. 453-469, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>.

Antunes, V.; Neves, J.; Freire, A. C. (2021). *Performance assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in road surface mixtures*. Recycling, 6 (2), 32. <https://doi.org/10.3390/recycling6020032>.

ARRB (2022). *Best practice expert advice on the use of recycled materials in road and rail infrastructures: Part A. Technical Review and Assessment*. Commonwealth Sustainable Procurement Advocacy and Resource Centre. Department of Agriculture, Water, and the Environment.

Aschenbrenner, B. (1956). *A new method of expressing particle sphericity*. Journal of Sedimentary Research, 26 (1), pp. 15-31. <https://doi.org/10.1306/74D704A7-2B21-11D7-8648000102C1865D>.

Bilal, M.; Oyedele, L. O.; Qadir, J.; Munir, K.; Ajayi, S. O.; Akinade, O. O.; Owolabi, H. A.; Alaka, H. A.; Pasha, M. (2016). *Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends*. Advanced Engineering Informatics, 30 (3), pp. 500-521. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>.

Blott, S. J.; Pye, K. (2008). *Particle shape: a review and new methods of characterization and classification*. Sedimentology, 55 (1), pp. 31-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x>.

Cabaço, L.; Brás, H.; Motta, G. (2017). *Relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. PORTUGAL*. Por ocasião da Apresentação Nacional

Voluntária no Fórum Político de Alto Nível das Nações Unidas. Ministério dos Negócios Estrangeiros.

CE (2023). *As prioridades da Comissão Europeia*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024_pt (consultado em 18/02/2023).

CEN (2002). *EN 13450 – Aggregates for railway ballast*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

Chen, C.; McDowell, G. R. (2016). *An investigation of the dynamic behaviour of track transition zones using discrete element modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230 (1), pp. 117-128, <https://doi.org/10.1177/0954409714528892>.

Correa-Silva, M.; Rouainia, M.; Miranda, T.; Cristelo, N. (2021). *Predicting the mechanical behaviour of a sandy clay stabilised with an alkali-activated binder*. Engineering Geology, 292, 106260, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106260>.

Cristelo, N.; Fernández-Jiménez, A.; Vieira, C.; Miranda, T.; Palomo, A. (2018). *Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash*. Construction and Building Materials, 170, pp. 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.057>.

Crucho, J.; Picado-Santos, L.; Neves, J. (2022). *Camadas de base e sub-base com misturas de agregados reciclados de betão tratadas com cimento e adição de fibra de coco*. 10º Congresso Rodoferroviário Português, Lisboa, Portugal.

Deiros, I.; Combe, G.; Emeriault, F.; Voivret, C.; Ferellec, J.-F. (2019). *X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale*. Granular Matter, 21 (30), <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0881-y>.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. (2002). *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Trans Evol Comput, 6, pp. 182–197.

Descantes, Y.; Russo, F.; Balabaud, J. M. (2007). *Angularity assessment of several railroad ballast sources using image processing*. Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Loizos, Scarpas, Al-Qadi (Eds.), 20-22 junho, p. 1809-1816, Athens, Greece, ISBN: 9780415448826.

EAPA (2023). *Asphalt in Figures 2021*. European Asphalt Pavement Association. <https://eapa.org/asphalt-in-figures> (consultado em 18/02/2023).

Elsamex (2014a). *Projeto de Execução dos Muros M14 e M24*. Autoestrada do Marão, A4/IP4 Amarante / Vila Real, Sublanço S3 – Nó de ligação ao IP4 / Nó de Campeã. Estradas de Portugal. Elsamex Portugal, Lisboa.

Elsamex (2014b). *Projeto de Execução dos Muros M40 e M41A*. Autoestrada do Marão, A4/IP4 Amarante / Vila Real, Sublanço S3 – Nó de ligação ao IP4 / Nó de Campeã. Estradas de Portugal. Elsamex Portugal, Lisboa.

European Commission (2001a). *ALT-MAT: Alternative materials in road construction*. Project Funded by European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, Final Report for Publication, ALT-MAT Contract No.: RO-97-SC.2238.

European Commission (2011b). *Final Report Summary – DIRECT_MAT (DISmantling and RECycling Techniques for road MATerials – Sharing knowledge and practices)*. Funded by European commission under the Seventh Framework Programme (FP7).

- Fernandes, E. M.; Monteiro, B. P. B.; Antunes, P.; Ramalho, J.; Simões, J. P. (2016). *Execução e controlo da qualidade aplicado na construção de aterros em solo-cimento*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto.
- Freire, A. C.; Neves, J. M.; Roque, A. J.; Martins, I. M.; Antunes, M. L. (2019). *Feasibility study of milled and crushed reclaimed asphalt pavement for application in unbound granular layers*. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (7), pp- 1500-1520.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1701539>.
- Folk, R. L. (1955). *Student operator error in determination of roundness, sphericity, and grain size*. *Journal of Sedimentary Research*, 25 (4), pp. 297-301.
<https://doi.org/10.1306/74D70493-2B21-11D7-8648000102C1865D>.
- Garcia-Lodeiro, I.; Cristelo, N.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A. (2020). *Use of industrial by-products as alkaline cement activators*. *Construction and Building Materials*, 253, 119000,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119000>.
- Gates, L.; Masad, E.; Pyle, R.; Bushee, D. (2011). *Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS2): Final Report*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. DoT, Washington DC, USA.
- Gomes Correia, A.; Magnan, J. P. (2012). *Trends and challenges in earthworks for transportation infrastructures*. *Advances in Transportation Geotechnics*, 2, pp. 1–12, ISBN: 9780415621359.
- Gomes Correia, A.; Neves, J.; Fortunato, E.; Parente, M. (2022). *A geotecnia nos pavimentos e vias-férreas e prospetivas para a era digital*. *Geotecnia*, 152, pp. 113-141
https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_4.
- Gomes Correia, A.; Winter, M. G.; Puppala, A. J. (2016). *A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics*. *Transportation Geotechnics*, 7, pp. 21–28,
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.003>.
- Gomes Correia, A.; Ferreira, S.; Roque, A.; Cavalheiro, A. (2009). *Portuguese steel slags. A new geomaterial*. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 1, pp. 15-18,
<https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-15>.
- Gomes Correia, A.; Roque, A.; Ferreira, S.; Fortunato, E. (2012). *Case study to promote the use of industrial byproducts: The Relevance of Performance Tests*. *Journal of ASTM International*. 9 (2), pp. 1-18,
<https://doi.org/10.1520/JAI103705>.
- Guo, Y.; Markine, V.; Zhang, X.; Qiang, W.; Jing, G. (2019). *Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review*. *Transportation Geotechnics*, 18, pp. 173-211,
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.12.001>.
- Hossain, M. U.; Ng, S. T.; Antwi-Afari, P.; Amor, B. (2020). *Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>.
- Huang, H.; Chrismer, S. (2013). *Discrete element modeling of ballast settlement under trains moving at "Critical Speeds"*. *Construction and Building Materials*, 38, pp. 994-1000,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.007>.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*, 1ª edição, Taylor & Francis, London, UK, ISBN: 978-0-203-81577-9,
<https://doi.org/10.1201/b10861>.

- Jerónimo, P.; Resende, R.; Fortunato, E. (2020). *An assessment of contact and laser-based scanning of rock particles for railway ballast*. *Transportation Geotechnics*, 22, pp. 100302, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100302>.
- Kalman, B. et al. (2013). *Final Report Summary – Re-Road (End of Life Strategies of Asphalt Pavements)*. Funded by European commission under the Seventh Framework Programme (FP7).
- Krumbein, W. C. (1941). *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. *Journal of Sedimentary Research*, 11 (2), pp. 64-72. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Le Pen, L. M.; Powrie, W.; Zervos, A.; Ahmed, S.; Aingaran, S. (2013). *Dependence of shape on particle size for a crushed rock railway ballast*. *Granular Matter*, 15 (6), pp. 849-861. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0437-5>.
- Marques, R.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2008). *Data mining applied to compaction of geomaterials*. Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign, Illinois, USA.
- Miranda, T.; Leitão, D.; Oliveira, J.; Correa-Silva, M.; Araújo, N.; Coelho, J.; Fernández-Jiménez, A.; Cristelo, N. (2020). *Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer*. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>.
- Moaveni, M.; Qian, Y.; Boler, H.; Mishra, D.; Tutumluer, E. (2014). *Investigation of ballast degradation and fouling trends using image analysis*. 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance – Railways 2014, Pombo, J. (Ed.), 8-11 abril, Ajaccio, Corsica, France.
- Nålsund, R. (2014). *Railway ballast characteristics – Selection criteria and performance*. Tese de Doutoramento, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Neves, J.; Martins, A.; Freire, A. C. (2016). *Catálogo de pavimentos com Resíduos de Construção e Demolição para estradas e arruamentos de baixo tráfego*. 8^o Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal.
- Neves, J.; Freire, A. C.; Qamhia, I.; Al-Qadi, I. L.; Tutumler, E. (2023). *Full-scale accelerated pavement testing and instrumentation*. In: Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M.G., Faria, P. (eds) *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_7.
- Onishi, M.; Tatano, H.; Marcelo, D.; House, S.; Raina, A.; Shibuya, N.; Newman, J.; Imura, S. (2018). *Infrastructure prioritization incorporating resilience*. International Seminar on Disaster and Risk Management for Roads. November 7-8, 2018. Hanoi, Vietnam.
- Paixão, A.; Fortunato, E. (2021). *Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry*. *Construction and Building Materials*, 267, 121225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>.
- Paixão, A.; Muralha, J.; Resende, R.; Fortunato, E. (2022). *Close-Range Photogrammetry for 3D Rock Joint Roughness Evaluation*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55 (6), pp. 3213-3233, <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02789-9>.

- Paixão, A.; Resende, R.; Fortunato, E. (2018). *Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method*. Construction and Building Materials, 191, pp. 963-976, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.048>.
- Palomo, A.; Maltseva, O.; Garcia-Lodeiro, I.; Fernández-Jiménez, A. (2021). *Portland versus alkaline cement: Continuity or clean break: “A Key Decision for Global Sustainability”*. Frontiers in Chemistry, 9, 705475, <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705475>.
- Parente, M.; Amândio, A.; Moutinho, J.; Gomes Correia, A. (2022). *Digital Twin optimization framework for earthworks production optimization and management*. Proceedings of the 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA2022), Trondheim, Norway.
- Parente, M.; Cortez, P.; Gomes Correia, A. (2015). *An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks*. Expert Systems with Applications, 42 (19), pp. 6674-6685, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.051>.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2014). *Use of Data Mining techniques in earthwork management: A case study*. Earthwork Project Management, Slope Stability Analysis, and Wave-Based Testing Techniques. American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication (GSP), 252, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1061/9780784478523.001>.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Figueira, G.; Mehra, A. (2018). *Towards improving earthworks production from an Industry 4.0 perspective: the role of remote information technologies and dynamic optimization techniques*. Proceedings of 7th Transport Research Arena (TRA 2018), Vienna, Austria.
- Pereira, G.; Parente, M.; Moutinho, J.; Sampaio, M. (2021). *Fuel consumption prediction for construction trucks: A noninvasive approach using dedicated sensors and machine learning*. Infrastructures, 6 (157), <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110157>.
- PIARC (2021). *Increasing resilience of earth structures to natural hazards*. A PIARC literature review. Report 2021R04EN. Technical Committee 4.3 Earthworks. PIARC.
- Pomponi, F.; Moncaster, A. (2017). *Circular economy for the built environment: A research framework*. Journal of Cleaner Production, 143, pp. 710-718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>.
- Pourakbar, S.; Huat, B. (2017). *A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils*. International Journal of Geotechnical Engineering, 11 (2), pp. 206-216, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>.
- Provis, J.; Van Deventer, J. (2014). *Alkali Activated Materials, State-Of-The-Art Report*. RILEM TC 224-AAM, first ed., Springer, Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- PRR (2023). *Plano de Recuperação e Resiliência*. <https://recuperarportugal.gov.pt/#conteudo>
- Reis, G. S.; Quattrone, M.; Ambrós, W.; Cazacliu, B.; Sampaio, C. (2021). *Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review*. Materials, 14, 1700, <https://doi.org/10.3390/ma14071700>.
- Sachs J.; Lafortune G.; Kroll C.; Fuller G.; Woelm F. (2022). *Sustainable Development Report 2022. From Crisis to Sustainable Development: the SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009210058>.
- SAMARIS (2004). *Literature review of recycling of by products in road construction in Europe. Deliverable 5 (SAM-06-DE05)*. Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure.

- Saussine, G.; Allain, E.; Vaillant, A.; Ribourg, M.; Neel, O. (2013). *High speed in extreme conditions: Ballast projection phenomenon*. International Workshop on Train Aerodynamics, 8-10 abril, Birmingham, UK.
- Shtayat, A.; Moridpour, S.; Best, B.; Shroff, A.; Raol, D. (2020). *A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7 (5), pp. 629-638, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.004>.
- Sousa, M. J. N.; Monteiro, B. P. B. (2009). *Do princípio do equilíbrio de materiais ao Plano de Gestão de Resíduos – Equívocos e benefícios*. Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas: Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector. CT-VROG/SPG/UA, Aveiro.
- Tinoco, J.; Gomes Correia, A.; Cortez, P.; Toll, D. (2017). *Stability condition identification of rock and soil cutting slopes based on soft computing*. Journal of Computing in Civil Engineering, 32 (2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000739).
- Tutumluer, E.; Huang, H.; Hashash, Y.; Ghataora, J. (2006). *Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad. Track lateral stability*. Proceedings of the AREMA 2006 Annual Conference, Louisville, Kentucky, USA.
- Tutumluer, E.; Qian, Y.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J.; Davis, D. D. (2013). *Discrete element modelling of ballasted track deformation behaviour*. International Journal of Rail Transportation, 1, pp. 57, <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.788361>.
- UN (2023). *The 17 goals*. Department of Economics and Social Affairs. Sustainable Development <https://sdgs.un.org/goals> (consultado em 18/02/2023).
- UEPG (2022). *Sustainable Supply of Aggregates in Europe*. Final Report 12/2022.
- Vasenev, A.; Hartmann, T.; Dorée, A. (2014). *A distributed data collection and management framework for tracking construction operations*. Advanced Engineering Informatics, 28 (2), <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.01.003>.
- Voivret, C.; Perales, R.; Saussine, G.; Costa D'aguiar, S.; Laurans, E.; Petit, P. (2013). *Multi-unit tamping machine: beyond the linear performance*. WCRR 2013 - World Congress on Railway Research, 25-28 Nov. 2013, Sydney, Australia.
- Wadell, H. C. (1932). *Volume, shape, and roundness of rock particles*. The Journal of Geology, 40 (5), pp. 443-451, <https://doi.org/10.1086/623964>.
- Xu, Y.; Yu, W.; Qie, L.; Wang, H.; Ning, N. (2021). *Analysis of influence of ballast shape on abrasion resistance using discrete element method*. Construction and Building Materials, 273, 121708, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121708>.
- Zhao, L.; Zhang, S.; Huang, D.; Wang, X. (2020). *A digitalized 2D particle database for statistical shape analysis and discrete modeling of rock aggregate*. Construction and Building Materials, 247, 117906, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117906>.