

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E GESTÃO DE TERRAPLENAGENS BASEADO EM *DIGITAL TWIN* E SIMULAÇÃO DE UM CASO DE ESTUDO

Earthworks management, monitoring and optimization system based on digital twin and simulation of a case-study

Manuel Parente^a, Margarida Amândio^b, Vicente Moreira^b, António Gomes Correia^a

^a University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal

^b BUILT CoLAB, Portugal

RESUMO - O planeamento de obras de terraplenagem procura fornecer um escalonamento dos recursos disponíveis de modo eficiente e económico. Porém, é comum ocorrerem situações imprevistas, como resultado de avarias dos recursos mecânicos, ou condições meteorológicas adversas, levando à necessidade de constante reorganização do fluxo de trabalho no estaleiro de construção. O presente trabalho descreve uma metodologia inovadora para apoiar o processo de tomada de decisão ao longo de todas as fases de construção, fornecendo soluções ótimas de alocação de recursos e correspondentes custos e duração. Durante a construção, o apoio à tomada de decisão é feito através da monitorização por meio de sensores, que permite avaliar o desempenho dos equipamentos de modo constante. O sistema pode fornecer sugestões de reajustes à alocação de recursos quando se verificar necessário para garantir que os trabalhos progridem otimamente. A metodologia é aplicada a um caso de estudo referente ao projeto de terraplenagens da construção de uma autoestrada em Portugal.

ABSTRACT – The aim of planning earthworks is to provide a efficient and economical scheduling of the available resources. However, it is common for unforeseen situations to occur, as a result of breakdowns in mechanical resources, or adverse weather conditions, leading to the need to constantly reorganise the workflow on the construction site. This paper describes an innovative methodology to support the decision-making process throughout all construction phases, providing optimal solutions for resource allocation and corresponding costs and duration. During construction, support for decision-making is provided through sensor-based monitoring, which allows for a constant assessment of equipment performance. The system can provide suggestions for readjustments to resource allocation when necessary to ensure that work progresses optimally. The methodology is applied to a case study concerning the earthworks project for the construction of a motorway in Portugal.

Palavras Chave – Terraplenagens, alocação de recursos, otimização multi-objectivo, sensorização, digital twin.

Keywords – Earthworks, resource allocation, multi-objective optimisation, sensorization, digital twin.

E-mails: map@civil.uminho.pt (M. Parente), margarida.amandio@builtcolab.pt (M. Amândio), vicente.moreira@builtcolab.pt (V. Moreira), agc@civil.uminho.pt (A. Gomes Correia)

ORCID: orcid.org/0000-0001-5765-2622 (M. Parente), orcid.org/0000-0002-6340-0648 (M. Amândio), orcid.org/0000-0002-0028-8150 (V. Moreira), orcid.org/0000-0002-0103-2579 (A. Gomes Correia)

1 – INTRODUÇÃO

Ao longo da última década, tem-se gradualmente evidenciado o potencial das abordagens de inteligência artificial (IA), nomeadamente das áreas de machine learning (ML) e otimização moderna, como ferramentas capazes de lidar ou mitigar os elevados níveis de incerteza e variabilidade inerentes ao sector da construção. Embora seja cada vez mais comum as empresas de construção e os projetistas recorrerem ao uso de novas tecnologias para promover a eficiência e reduzir os custos, um grande número de projetistas ainda se baseia na intuição e na experiência para organizar, gerir e estimar as taxas de trabalho dos processos e equipamentos de construção, em especial em áreas de Geotecnia tais como terraplenagens (SETRA e LCPC, 2000; Parente et al., 2016).

De fato, as tecnologias associadas com ML já demonstraram a sua capacidade de contribuir para a estimativa com maior precisão de produtividade e custos de equipamentos de construção em atividade (Gomes Correia e Magnan, 2012; Parente et al., 2014; Pereira et al., 2021, Silva et al., 2023), superando os tipicamente propostos nos manuais dos fornecedores de equipamentos (Gomes Correia et al., 2013; Jassim et al., 2017; Kassem et al., 2021), assim como para o apoio à decisão no contexto da procura e adoção de soluções de alocação de equipamentos em estaleiros de construção ao longo de todo o projeto de execução de obras através de algoritmos de otimização moderna (Montaser e Moselhi, 2014; Parente et al., 2015; Parente et al., 2016). A adoção deste tipo de sistemas em fases de planeamento e projeto apresentam inúmeras vantagens, entre as quais se pode sublinhar a capacidade de encontrar soluções de alocação de recursos de construção capazes de otimizar vários aspetos em simultâneo, tais como custos de construção, duração de execução e emissões de carbono. Porém, as soluções existentes até ao momento compreendem sistemas de previsão e/ou otimização *offline*, cuja capacidade de adaptação a ocorrências imprevistas durante a construção (e.g., avarias de equipamentos, presença de geomateriais diferentes dos esperados, alterações climáticas, entre outros) é limitada e dependente da capacidade do gestor de obra de atualizar os sistemas manualmente e procurar novas soluções.

Mais recentemente, o desenvolvimento de conceitos ligados com a Indústria 4.0 (I4.0) noutras áreas promoveu a exploração de tecnologias tais como *Internet of Things* (IoT), sensorização e *digital twins* também no setor da construção (Parente et al., 2020). Neste contexto, a combinação das abordagens de previsão e otimização anteriormente mencionadas com as novas tecnologias associadas com a I4.0 permite a integração dos sistemas (anteriormente *offline*) com a capacidade de monitorização de equipamentos e processos em tempo real. De fato, a integração de sensores em equipamentos de construção, juntamente com a implementação de ambientes IoT, permite o conhecimento não só da posição e da atividade de equipamentos tais como escavadoras, *dumpers* de transporte de geomateriais, espalhadores e compactadores, como também de uma série de parâmetros associados à sua produtividade em tempo real (Lee et al., 2018; You et al., 2021). Um exemplo muito representativo destas capacidades pode ser encontrado nos compactadores inteligentes, cuja capacidade de ajustar a energia de compactação aplicada em função da resposta do geomaterial se alia à criação de mapas de compactação em tempo real (Parente e Gomes Correia, 2013), produzindo assim a informação necessária para aferir a sua produtividade a cada momento de atividade.

Neste contexto, torna-se possível dar resposta à volatilidade e incerteza inerente aos processos de construção de terraplenagens adotando uma abordagem de otimização reativa, no qual os sistemas de previsão e otimização são atualizados em tempo real com os dados provenientes dos sistemas de monitorização remota (Parente et al., 2018; Salem and Moselhi, 2020; Liu et al., 2022). Os sistemas resultantes englobam tanto sistemas de alarme (i.e., *watch dog systems*), que providenciam informação ao utilizador sobre situações que podem ser potencialmente prejudiciais ao progresso ótimo dos trabalhos (e.g., equipamentos a funcionar abaixo da produtividade estimada ou em

possível avaria), como algoritmos de re-otimização capazes de propor ajustes mínimos à solução atual de alocação de equipamentos que melhorem a fluidez e produtividade dos processos de construção em função dos dados recebidos dos sensores instalados. O presente trabalho apresenta uma aplicação dum sistema deste tipo, que representa uma evolução de um sistema de otimização *offline* desenvolvido anteriormente (Parente et al., 2015), a um caso de estudo correspondente a uma obra real de terraplenagens no âmbito da construção de uma autoestrada em Portugal. É dada particular atenção à fase de construção, uma vez que esta engloba a monitorização em tempo real dos recursos e a reotimização multiobjetivo da alocação de recursos de construção (i.e., equipamentos mecânicos), o que é fundamental em termos de competitividade e produtividade das empresas.

O artigo está estruturado da seguinte forma: A Secção 2 introduz a arquitetura do sistema, descrevendo os seus módulos e tecnologias subjacentes, assim como o respetivo mapa de processo que representa o fluxo de trabalho durante a utilização do sistema. A Secção 3 apresenta uma simulação baseada no caso de estudo anteriormente mencionado, com uma análise de otimização e re-otimização em resultado de um comportamento imprevisível simulado referente à redução inesperada na produtividade de um recurso de construção durante a sua atividade. Por fim, na Secção 4 são apontadas algumas conclusões, bem como direções futuras de investigação.

2 – SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO BASEADO EM DIGITAL TWIN

2.1 – Arquitetura

Um dos aspetos centrais que possibilita a análise das configurações de alocação ótima de recursos em qualquer ambiente é a compilação e estruturação em bases de dados da informação necessária ao processo. No contexto do sistema de otimização de terraplenagens desenvolvido, esta informação pode ser dividida em dados estáticos, dados dinâmicos e dados históricos. Por um lado, os dados estáticos compreendem informação relativa às características da obra e dos trabalhos a realizar, assim como à disponibilidade e especificações dos equipamentos existentes. Por outro lado, os dados dinâmicos referem-se aos obtidos a partir dos sensores instalados nos recursos existentes. Dependendo da natureza e das condições do estaleiro, estes dados podem ser enviados em tempo real, atingindo volumes consideráveis de informação instantânea em cada instante de tempo que codificam o desenvolvimento das operações e das condições dos equipamentos ativos. Finalmente, os dados históricos correspondem à evolução dos trabalhos ao longo do tempo tendo como objetivo o registo dos processos realizados e escolhas adotadas, incluindo informação tal como as soluções de alocação implementadas em cada fase de obra, ou notificações relativas à realização de tarefas por parte das equipas de produção.

Como referido anteriormente, o processo de otimização consiste numa procura multiobjectivo de soluções de alocação. Os objetivos desta otimização podem abordar a minimização (ou maximização) de qualquer combinação de critérios matematicamente quantificáveis, sendo exemplos relevantes a duração total de execução do projeto de construção, os custos totais de execução, ou outros aspetos relevantes, tais como as emissões de carbono acumuladas de uma determinada possível solução. Tipicamente, numa análise multiobjectivo o resultado é representado por uma frente de Pareto, caracterizada por uma série de soluções ótimas, em que cada uma delas corresponde a um compromisso ótimo entre os objetivos considerados (e.g., tempo vs custo). Este tipo de representação de soluções permite uma maior flexibilidade do modelo apresentado, uma vez que os tomadores de decisão têm à sua disposição várias soluções ótimas, podendo escolher a que melhor se adequa às restrições e metas do projeto (e.g., orçamento, datas limites). É importante referir que as soluções resultantes do processo de otimização não são estáticas ao longo do tempo. i.e., quando uma equipa termina o seu trabalho numa frente de trabalho, é imediatamente reatribuída a outra frente. Uma vez que a produtividade das equipas em tarefas sequenciais é sincronizada,

evitam-se também os estrangulamentos de produtividade, assegurando-se que se obtém a máxima produtividade dos recursos de produção.

Por último, para que estes dados possam mais facilmente ser decifrados e interpretados pelos utilizadores do sistema, é necessária a existência de uma camada de visualização e interface do utilizador. Nesta interface, a informação disponibilizada ao utilizador traduz-se na sintetização dos dados processados das entidades ativas (i.e., recursos produtivos ativos) de acordo com os dados dos sensores de geolocalização, bem como dos resultados dos sensores de monitorização do controlo de qualidade. Para além de permitir o controlo e monitorização dos recursos ativos por meio de um *digital twin* do estaleiro suportado por sensores e por um sistema de informação geográfica (SIG), são também estes dados que alimentam a plataforma de otimização com a informação necessária à determinação da afetação ótima dos recursos em todo o estaleiro e ao longo do tempo (Figura 1).

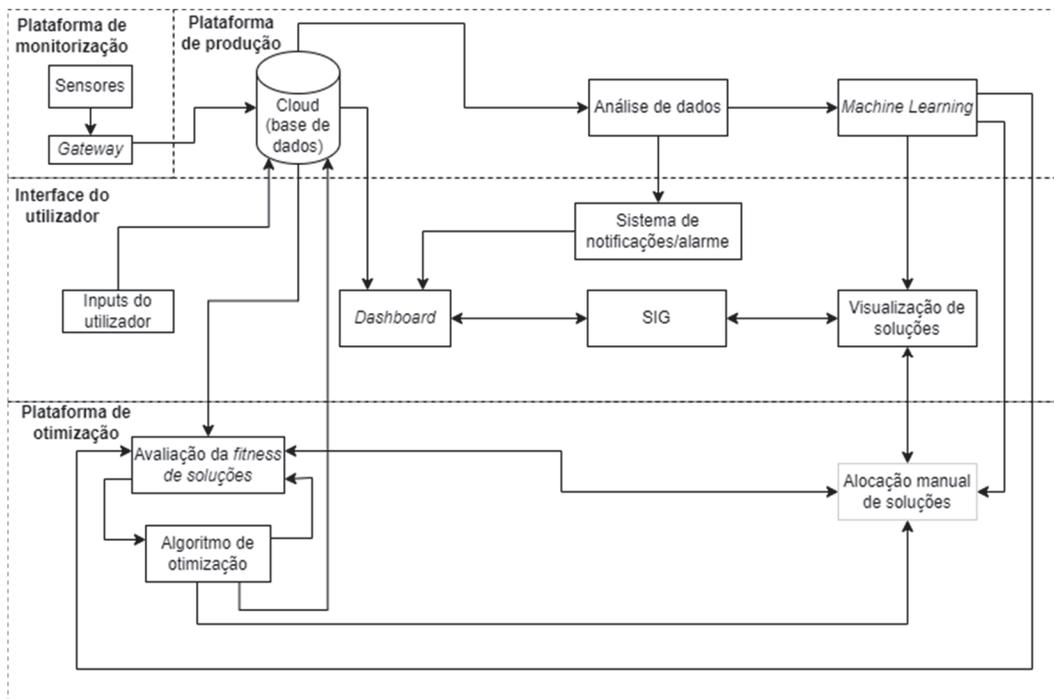


Fig. 1 – Arquitetura do sistema

2.2 – Fluxo de trabalho da metodologia de gestão e otimização

Como comprovado por trabalhos anteriores, o processo de terraplenagem pode ser equiparado a uma linha de produção (Parente et al., 2015) composta por diferentes atividades desde a escavação e o transporte de geomateriais (nas frentes de escavação) até ao espalhamento e compactação dos mesmos (nas frentes de aterro). Considerando que, como anteriormente mencionado, os processos de terraplenagem são caracterizados por elevados níveis de incerteza, é necessário conferir ao planeamento dos processos flexibilidade suficiente para permitir a adaptação dos planos a situações imprevistas que ocorram durante a execução dos trabalhos. Uma das maneiras de atingir este objetivo é adotar uma postura reativa no planeamento e durante a execução da obra, assumindo que a necessidade de ajustar o planeamento inicial será constante ao longo do desenvolvimento dos processos de terraplenagens de modo a manter a produtividade e custos em valores ótimos.

As tecnologias de monitorização e controlo remoto de recursos ativos podem suportar esta postura de planeamento reativo providenciando informação em tempo real sobre a possibilidade de ocorrência de situações imprevistas, assim como a sua natureza e origem. Especificamente no contexto das terraplenagens, devido às suas características de sequencialidade e interdependência da produtividade entre tarefas, a monitorização dos meios de transporte de geomateriais entre frentes de escavação e aterro por meio de GPS permite inferir a produtividade aproximada de todas as equipas ativas nas linhas de produção respetivas (Lee et al., 2018). Adicionalmente, uma vez que o investimento em equipamento de monitorização se limita à instalação de GPS em camiões, esta alternativa é especialmente *low-cost*, tanto em termos de custos de equipamentos de monitorização como em termos de requerimentos de transmissão de dados no estaleiro.

O mapa de processo e fluxo de informação propostos neste trabalho estão descritos na Figura 2. O processo inicia-se com a implementação de uma solução ótima de alocação de recursos calculada *offline*, isto é, tendo como base as estimativas de produtividade e custos inseridas pelo utilizador na interface para cada tipo de equipamento disponível (não só equipamentos de transporte, mas também de escavação, espalhamento e compactação) antes do início da obra, assim como para os trabalhos a realizar (frentes de aterro e escavação, volumes de material a escavar/aterrar, tipos de geomateriais existentes nas frentes de escavação e distâncias entre frentes de trabalho). A metodologia seguida para esta otimização inicial baseia-se numa implementação do algoritmo de otimização multiobjectivo proposto em Parente et al. (2015), providenciando ao utilizador uma frente de Pareto de soluções viáveis, com custos e durações de execução variáveis e ótimos (i.e., correspondentes a *trade-offs* ótimos entre custo e duração), das quais uma das soluções é escolhida pelo utilizador e concretizada em obra. A cada solução corresponde o escalonamento dos recursos disponíveis ao longo do tempo de modo a obter os custos e durações associados, como se demonstra na Secção 3.

A partir do momento que se inicia a fase de construção, a monitorização dos equipamentos de transporte anteriormente mencionada regista constantemente a posição dos camiões e *dumpers* na sua atividade de transporte de geomateriais entre as frentes de escavação. Esta informação é processada e incluída numa base de dados dinâmica e é complementada por informação periódica relativa ao balanço mensal dos volumes escavados e aterrados nas frentes de trabalho obtidos por parte da equipa de topografia no estaleiro, que é a prática usual por partes das empresas de construção em obras de terraplenagens. Esta informação periódica permite corrigir as estimativas de capacidade média dos camiões em cada ciclo de carga-descarga mensalmente, atualizando os valores médios de geomaterial transportado por ciclo em função das medições reais de volumes de geomateriais escavados e aterrados realizadas no fim de cada mês. Por sua vez, para determinar o número de ciclos de carga-descarga de cada equipamento de transporte, adotaram-se técnicas de *geo-fencing*. Estas últimas permitem definir uma área num SIG à volta das frentes de escavação e/ou aterro, delimitada por linhas definidas por coordenadas, de modo a que seja contado o número de vezes que um dos equipamentos de transporte cruze estas linhas. Assim, juntamente com a estimativa periodicamente atualizada da capacidade de carga dos equipamentos de transporte, é contabilizado também o número de ciclos de carga e descarga diários de cada um, permitindo inferir com um nível de exatidão razoável a produtividade diária de cada equipamento individual (e.g., m³ de geomaterial transportado por dia). Finalmente, considerando a interdependência de produtividades natural às linhas de produção e tendo como base o volume de geomaterial transportado por hora (i.e., produtividade das equipas de transporte), é também possível inferir a produtividade das equipas de escavação associadas à carga de cada equipa de transporte, assim como a produtividade das equipas de compactação que recebem constantemente as descargas do volume de material transportado.

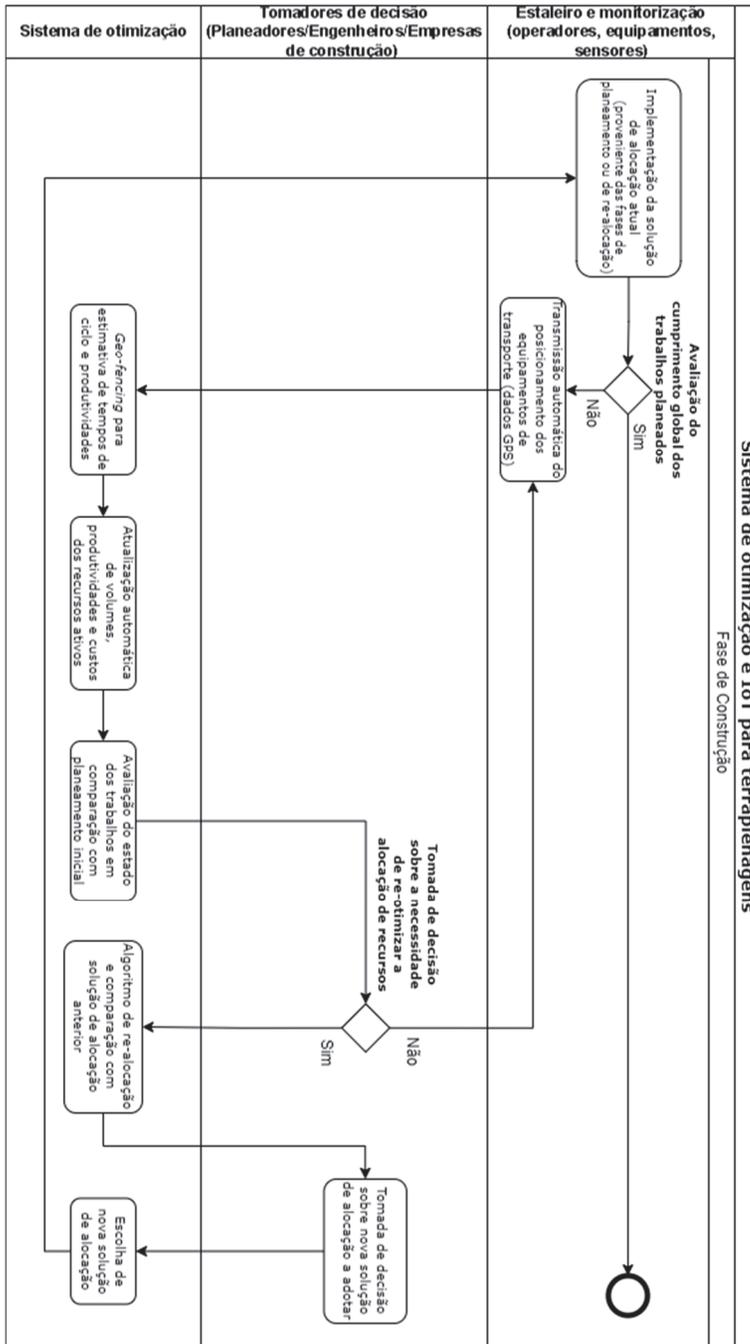


Fig. 2 – Mapa de processo e fluxo de informação da metodologia proposta

Embora a metodologia de monitorização aqui descrita não torne possível a identificação da produtividade individual de cada equipamento ativo, permite, porém, a estimativa com exatidão razoável das produtividades das equipas ativas. Por conseguinte, torna-se possível, através dessa

estrutura de monitorização *low-cost*, controlar todas as equipas ativas em frentes de trabalho e identificar variações da produtividade da equipa como um todo face às estimativas previstas em fase de planeamento (i.e., antes do início da obra). Sempre que as produtividades das equipas ativas variam o suficiente para causar discrepâncias negativas em comparação com o planeamento inicial, o sistema gera avisos e/ou alarmes, identificando a equipa (ou o equipamento individual, caso se trate de um equipamento de transporte), o local e a natureza da discrepância. A qualquer momento, existe a possibilidade, do lado do utilizador principal, de atualizar as estimativas tanto de produtividade como de volumes de geomateriais nas frentes manualmente (se necessário) para ir de encontro a qualquer informação adicional que recolha no momento. Para além disso, a qualquer momento o utilizador pode solicitar ao sistema que sugira novas soluções de alocação de equipamentos (i.e., re-otimização) sempre que se verificar que as discrepâncias de produtividades são demasiado altas ou que existam novas condições de otimização (e.g., tipos de geomateriais diferentes, alterações às estimativas dos volumes de geomateriais por frente, equipamentos avariados que já não estão disponíveis, ou novos equipamentos que possam ser alugados que passem a estar disponíveis, entre outros). Deste modo, o utilizador consegue encontrar novas soluções que mitiguem potenciais atrasos ou até que possam ser mais eficientes que a solução de alocação atual para as novas condições de trabalho/de otimização. É de notar que, como será descrito em maior pormenor na Secção 3, o algoritmo de re-otimização toma em conta a disrupção inserida no estaleiro como consequência da alteração da alocação dos equipamentos, calculando o efeito de alterar a posição de vários equipamentos que pode ter consequências negativas na eficiência dos processos, ainda que apenas temporariamente.

Para além disso, a metodologia acrescenta ao utilizador principal a possibilidade de monitorizar também o posicionamento dos equipamentos tanto das frentes de trabalho como das equipas de transporte, gerando avisos e alarmes em situações em que se verifique que os equipamentos não estão nas zonas às quais foram alocados, que estão parados e inativos (no caso dos equipamentos de transporte), ou que haja falha de envio de informação por parte dos sensores GPS. Ao mesmo tempo, esta metodologia pode também ser adaptada para incluir outros tipos de utilizador aos quais seja facultada informação parcial, como por exemplo os operadores dos equipamentos, que podem ter acesso a informação tal como a sua produtividade média, a produtividade das equipas a jusante e montante da tarefa a que está alocado, os tempos previstos para a chegada do próximo camião, entre outros.

3 – APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO

A metodologia proposta foi aplicada a um caso de estudo de terraplenagens correspondente a uma obra real de construção de autoestrada executada em Portugal. A aplicação ao caso de estudo dividiu-se em duas fases principais: a fase de planeamento e a fase de construção. Enquanto a primeira está relacionada com o planeamento do projeto de terraplenagem antes do início da obra, a segunda diz respeito à gestão da construção da terraplenagem e ao processo de tomada de decisões.

3.1 – Inputs necessários pelo sistema

As especificações do local da obra de terraplenagem são apresentadas no Quadro 1. Os recursos disponíveis para realizar o trabalho são resumidos nos Quadros 2 e 3 para os equipamentos de aterro e escavação, respetivamente. A Figura 3 representa a obra linear em planta, com as respetivas frentes de trabalho de escavação e aterro. Neste caso de estudo, não houve necessidade de otimizar os volumes de escavação e transporte (i.e., diagrama de Bruckner), uma vez que essa decisão tinha previamente sido tomada e as distâncias/volumes de transportes já estabelecidas. No que concerne aos volumes de escavação e transporte, é relevante ter em conta as especificidades de um projeto de terraplenagem, que é fortemente influenciado pelas características geotécnicas dos materiais

Quadro 1 – Informações gerais dos trabalhos de terraplenagem

Dados globais	
Extensão total (m)	20 368
Volume processado total (m ³)	1523206
Número de frentes de escavação	15
Número de frentes de aterro	24

Quadro 2 – Equipamentos de aterro*

	Modelo	Peso em operação (ton)
Cilindros compactadores (6)	CATERPILLAR CS 78 B (3)	18.70
	CATERPILLAR CS 683 E (3)	18.80
Espalhadoras (14)	CATERPILLAR D6 (9)	23.01
	CATERPILLAR D8 (4)	39.75
	CATERPILLAR D9 (1)	49.99

*Número total de equipamentos entre parêntesis

Quadro 3 – Equipamentos de escavação*

	Modelo	Capacidade (m ³)
Escavadoras (28)	CATERPILLAR 330D LN (1)	2.07
	CATERPILLAR 330GC (4)	1.54
	CATERPILLAR 336GC (5)	1.88
	CATERPILLAR 352F (1)	3.10
	HITACHI ZX170W-6 (4)	0.60
	VOLVO EC 250 ENL (7)	0.95
	VOLVO EC 300 ENL (1)	1.32
	VOLVO EC 380 ENL (2)	1.42
	VOLVO EC 480 EL (2)	2.10
	VOLVO EW 180 E (1)	0.87
Camiões e <i>dumpers</i> (39)	MERCEDES ACTROS 3236K/42 (2)	19.20
	MAN TGS 35.360 8x4 (4)	13.00
	MERCEDES AROCS 3243K (15)	13.40
	MERCEDES AROCS 3243K AOE (2)	14.00
	VOLVO A-40 (11)	22.50
	VOLVO A40G (3)	24.00
	VOLVO A-30 D 6x6 (2)	18.00

*Número total de equipamentos entre parêntesis

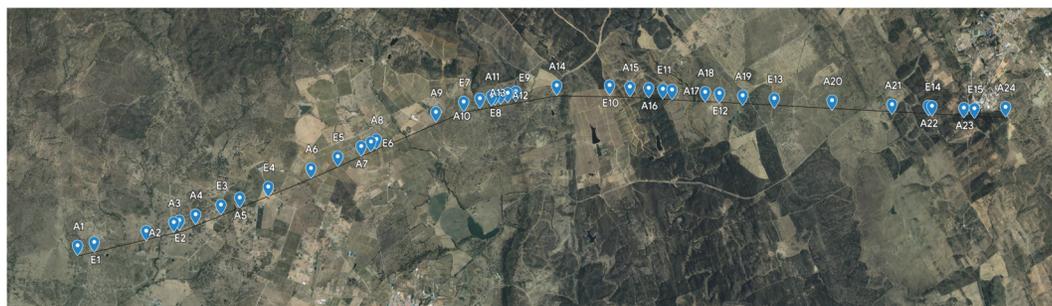


Fig. 3 – Representação em planta das frentes de trabalho e a sua distribuição geográfica ao longo da linha de obra

presentes em obra, assim como pelo processo de compactação na construção de aterros. De facto, uma das restrições que geralmente caracteriza as obras de terraplenagem está relacionada com o fato de os materiais usados para construir os aterros serem os mesmos que resultam dos processos de escavação nas frentes correspondentes (com algumas exceções, em particular no que diz respeito a frentes de empréstimo). Esta aparentemente simples restrição tem várias implicações no planeamento e execução deste tipo de projetos. Em termos de otimização da alocação de equipas, e tendo em consideração que os tipos de geomaterial escavados são os mesmos que vão ser compactados no âmbito da construção de aterros, a alocação de um determinado cilindro compactador a uma frente de aterro implica que a sua produtividade vai ser limitada não só pelas produtividades das equipas de escavação, transporte e espalhamento que lhe precedem (i.e., como resultado da sequencialidade e interdependência das produtividades das linhas de produção), mas também pelo tipo de geomateriais presentes nas frentes escavação e transportados para essa frente de aterro, de acordo com o planeado no diagrama de Bruckner. Subsequentemente, a determinação da produtividade dos cilindros torna-se um processo complexo, pois verifica-se que a produtividade de um determinado cilindro varia quando alocado a frentes diferentes. Ao mesmo tempo, uma só frente de aterro pode receber geomateriais transportados de várias frentes de escavação com geomateriais totalmente diferentes, o que acrescenta complexidade adicional à estimativa da produtividade das equipas de compactação. Nestes casos, a produtividade de compactação pode ser estimada por meio da média pesada da quantidade de cada tipo de material recebido na frente de aterro correspondente, que, por sua vez, é também função das produtividades das equipas a montante da compactação (i.e., produtividades das equipas de escavação, transporte e espalhamento). Assim, facilmente se pode inferir que os processos de compactação são de extrema relevância no que diz respeito ao progresso das obras de terraplenagem, não só como consequência da complexidade da sua execução em termos técnicos (e subsequente complexidade na estimativa da sua produtividade), mas também porque, do ponto de vista das linhas de produção de terraplenagem, correspondem ao processo geralmente identificado como o *bottleneck* de produtividade da linha de produção. Como resultado, a compactação coincide normalmente com o processo da linha de produção cuja produtividade e eficiência devem procurar-se maximizar, uma vez que isso implica a inerentemente a maximização das produtividades e eficiências dos processos a montante do mesmo, sendo, portanto, este um dos objetivos principais da metodologia e do sistema de otimização proposto. Neste contexto, é de notar que a estimativa da produtividade dos cilindros de compactação foi determinada com recurso à classificação de cilindros e geomateriais proposta pelo *Guide des Terrassements Routiers* (GTR) (SETRA e LCPC, 2000), enquanto que a produtividade dos restantes equipamentos foi estimada a partir dos manuais e da informação disponibilizada pelo respetivo fabricante. O GTR é um guia de compactação resultante da compilação de conhecimento empírico na área da construção de aterros originado em França. No entanto, para além de constituir a

referência de base para a construção de aterros e de camadas de leito de pavimento em França, o conhecimento deste guia pode ser generalizável a qualquer tipo de geomaterial e equipamento de compactação no mundo, como já foi demonstrado em vários trabalhos (Marques et al., 2008; Parente e Gomes Correia, 2013). De acordo com o guia, a estimativa da produtividade de um cilindro de compactação é função do geomaterial, das especificações do equipamento e das condições do local (i.e., nomeadamente no que concerne ao estado de humidade do geomaterial). Por um lado, a classificação dos geomateriais é função de características tais como a dimensão máxima dos agregados, o valor do ensaio azul de metileno e os limites de Atterberg, todos estes sendo ensaios já tradicionalmente adotados na caracterização de solos em laboratório previamente e durante as obras de terraplenagem. Por outro lado, a classificação dos cilindros de compactação segundo o guia está diretamente relacionada com as especificações do mesmo, nomeadamente o tipo de compactador (i.e., vibrador, estático, de pneus), o seu peso em funcionamento, largura do tambor, e parâmetros de vibração, quando aplicável. Esta avaliação dos geomateriais e dos equipamentos procura ser suficientemente detalhada para permitir a determinação da energia de compactação necessária para obter bons resultados de compactação, dependendo do tipo de material e das condições *in situ*. Assim, é possível obter do GTR um valor de produtividade teórica estimada de um cilindro em determinadas condições de trabalho com bastante precisão (i.e., assumindo que a produtividade do cilindro não está limitada pela quantidade de geomaterial disponível) ainda antes de iniciar a obra, incluindo para espessuras de camada, velocidade e número de passagens variáveis. Neste caso de estudo, tanto os cilindros de compactação disponíveis como os geomateriais existentes nas frentes de escavação tinham características semelhantes no que concerne à classificação GTR, apresentando os cilindros classe V4, enquanto os geomateriais classe B2. O sistema proposto está configurado para solicitar a classificação GTR como input do utilizador, tanto para os cilindros como para os geomateriais nas frentes de escavação, permitindo-lhe então realizar os cálculos preconizados pelo GTR para estimar a produtividade de cada cilindro alocado a uma determinada frente de aterro em função dos geomateriais que para lá serão transportados e das condições de trabalho no local.

Atendendo à complexidade e multiplicidade de soluções possíveis para a alocação dos equipamentos pelas frentes de trabalho, assim como à natureza dinâmica do problema, a solução adotada deve ser também de natureza dinâmica. A componente dinâmica do problema está relacionada com o fato de, durante a execução dos trabalhos de terraplenagem, existirem várias equipas de escavação e compactação que irão concluir os seus trabalhos nas respetivas frentes em momentos diferentes, levando a uma reafectação dessa equipa a outras frentes de trabalho ou a uma redistribuição da mesma em conjunto com as restantes equipas para que os trabalhos continuem de um modo ótimo. Por esta razão, o algoritmo de otimização proposto fornece soluções ótimas em termos de minimização do custo e do tempo globalmente para todo o planeamento e construção da terraplenagem, dividido em várias fases de obra (i.e., sendo que cada “fase de obra” acaba sempre que os trabalhos numa frente de trabalho chegam à sua conclusão), em oposição a uma otimização local, que apenas abordaria cada fase de trabalho individualmente.

Para que seja possível o cálculo das soluções ótimas tanto em termos de custo como de tempo, o algoritmo requer informação relativa às especificações dos recursos de equipamento disponíveis, incluindo cilindros compactadores, espalhadoras (e.g., bulldozers, motoniveladoras), escavadoras e camiões, tal como exemplificado no Quadro 4. Para além disso, é também necessário fornecer informações sobre as frentes de trabalho no que concerne à sua localização, o volume do de geomaterial a processar, o número máximo de equipamentos ativos em simultâneo para cada frente de trabalho (i.e., que permite transmitir ao sistema restrições de espaço) e as distâncias entre as frentes de trabalho de escavação e de aterro. É de notar que, como resultado do seu funcionamento, o algoritmo de otimização faz a própria seleção da frota ótima em função dos equipamentos disponíveis, i.e., não utiliza necessariamente todos os equipamentos disponíveis se isso implicar soluções menos eficientes.

Quadro 4 – Inputs necessários relativos aos equipamentos disponíveis para o caso dos cilindros compactadores

Parâmetro	Descrição
Modelo	Modelo do equipamento
Matrícula	ID interno do equipamento
Custos	Custos associados ao aluguer e operação dos equipamentos (e.g., consumo de combustível, mão de obra) por hora de funcionamento
Fator de eficiência (k)	Fator de eficiência, que toma em conta o fato de que uma hora o tempo efetivo de trabalho dos equipamentos em cada hora é regra geral inferior a 60 minutos, dependendo da capacidade do operador, da manutenção, das condições do local, entre outros.
Emissões	Emissões de gases de carbono por hora de funcionamento (opcional)

3.2 – Fase de planeamento

Tendo acesso à informação relativa aos trabalhos a realizar e recursos disponíveis descrita na subsecção anterior, o sistema é então capaz de fornecer várias possíveis soluções ótimas correspondentes a um compromisso entre objetivos (i.e., custo vs. duração). A Figura 4 representa a frente de Pareto de soluções obtida para a fase de planeamento neste caso de estudo. O algoritmo de otimização adotado para obter as soluções aqui apresentadas foi um *non-dominated sorting genetic algorithm-II* (NSGA-II) (Deb *et al.*, 2002), implementado em C#, com os seguintes

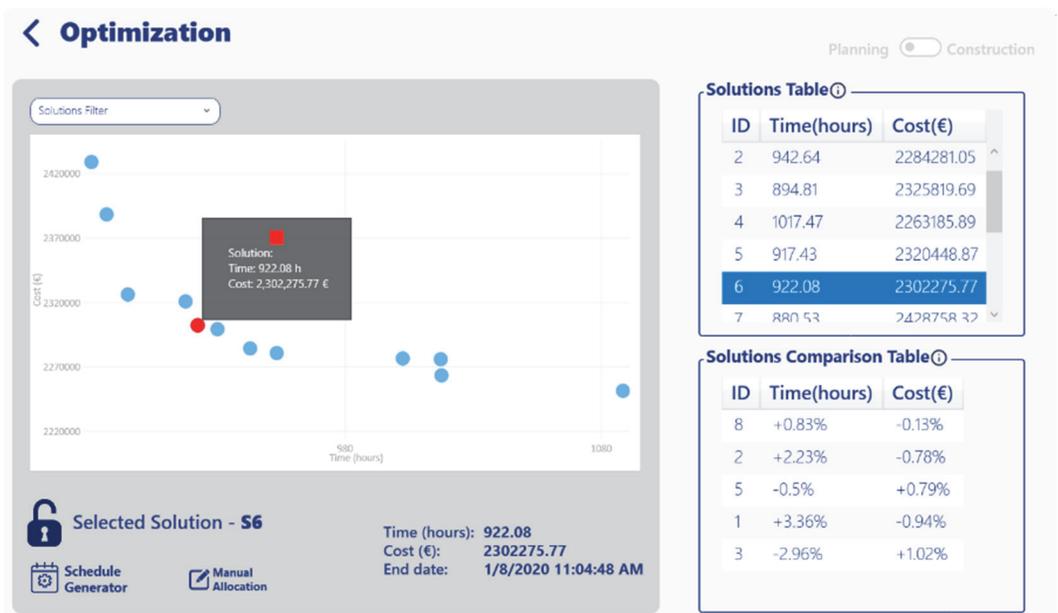


Fig. 4 – Print screen do sistema relativo a frente de Pareto com solução selecionada, incluindo as características da mesma (Solução 6 – ponto vermelho)

parâmetros de otimização: tamanho da população e o número máximo de gerações de 100, probabilidade de *crossover* de 0.8, probabilidade de mutação de 0.2 e número de objetivos de minimização de 2 (tempo e custo). O esforço computacional correspondeu a cerca de 3 horas de cálculo utilizando um computador portátil pessoal de características comuns, nomeadamente com um processador Intel i7-10750H 2.60GHz, com 16GB de memória RAM e Windows 11 como sistema operativo. Note-se que este tempo de cálculo pode ser melhorado aumentando os recursos computacionais ou utilizando tecnologias correntes, tais como servidores dedicados ou tecnologias de *cloud computing*. No entanto, a versão atual é consistente com a utilização prevista para o sistema mesmo em fases de execução da obra, nomeadamente o de realização dos cálculos durante a noite, permitindo a reorganização da frota de equipamentos na manhã seguinte, caso necessário.

Para cada solução gerada e representada na Figura 4, é possível verificar o planeamento detalhado ao longo de todas as fases de terraplenagem. As Figuras 5 a 7 demonstram vários tipos de visualização da mesma solução (Solução 6) em três representações diferentes, nomeadamente em formato de tabela (Figura 5), em formato baseado em linhas de balanço (Figura 6), ou em mapa/planta (Figura 7), nas quais se pode verificar a alocação dos equipamentos por frente de trabalho e ao longo do tempo. Enquanto o formato de tabela e o formato de mapa representam modos de visualização intuitivos e exportáveis para formato *spreadsheet* ou imagem, respetivamente, é importante mencionar que o formato representado na Figura 6 foi adaptado dos diagramas de linhas de balanço convencionais. De fato, trata-se de uma representação gráfica interativa da evolução de todas as frentes de trabalho de escavação ao longo do progresso da obra de terraplenagens sob a forma de uma matriz, em que cada linha representa uma frente de trabalho de escavação e cada coluna representa uma fase com a respetiva frente de trabalho concluída (podendo ser mais do que uma). Ao longo de cada linha da matriz, é possível acompanhar a evolução do volume de material a escavar para cada frente de trabalho correspondente e ao longo de todas as fases. Cada célula, composta por um gráfico de linhas local que representa a frente de trabalho de aterro que está a receber o material escavado, representa o estado atual dessa frente de trabalho de escavação numa determinada fase. Os pontos inicial e final desse gráfico de linhas correspondem aos volumes de

Phase	Day	Hours	Resource Type	Resource ID	Front Type	Front ID	Start Date	End Date
18	1	8	roller	44/250	embankment	A24	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	roller	44/252	embankment	A9	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	spreader	32/550	embankment	A24	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	excavator	20/350	excavation	E10	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	spreader	32/547	embankment	A9	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	roller	44/022	embankment	A19	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	excavator	21/410	excavation	E7	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	roller	44/023	embankment	A24	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	excavator	20/351	excavation	E13	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	excavator	20/109	excavation	E11	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	roller	44/251	embankment	A19	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM
18	1	8	spreader	32/610	embankment	A19	7/31/2019 12:00:00 AM	7/31/2019 8:00:00 AM

Fig. 5 – Print screen do sistema relativo à visualização da alocação correspondente à Solução 6 para a fase de obra 18 em formato de tabela.

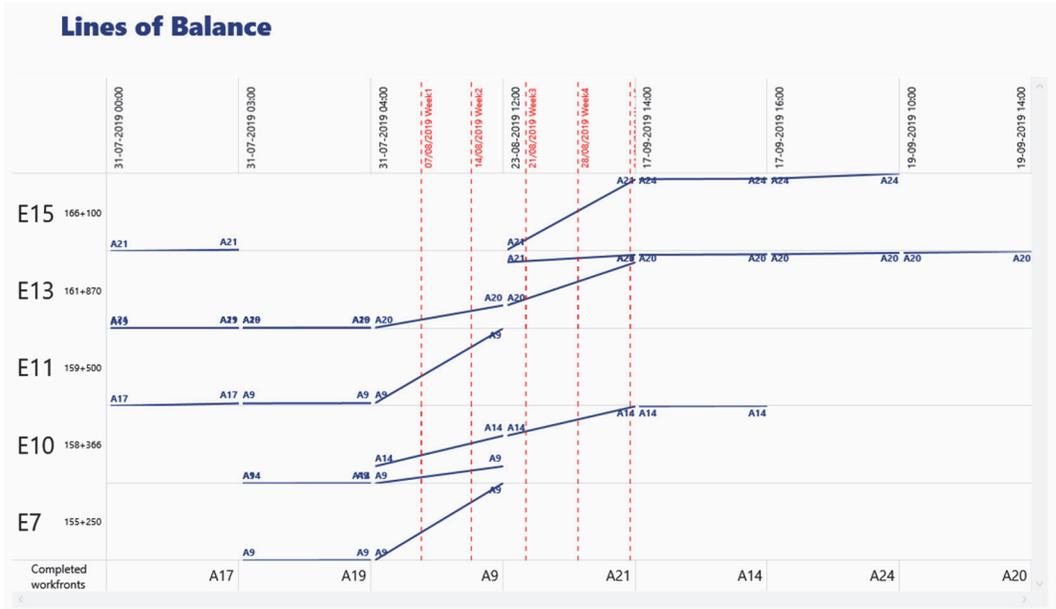


Fig. 6 – *Print screen* do sistema relativo à visualização da alocação correspondente à Solução 6 para a fase de obra 18 em formato de diagrama baseado em linhas de balanço.

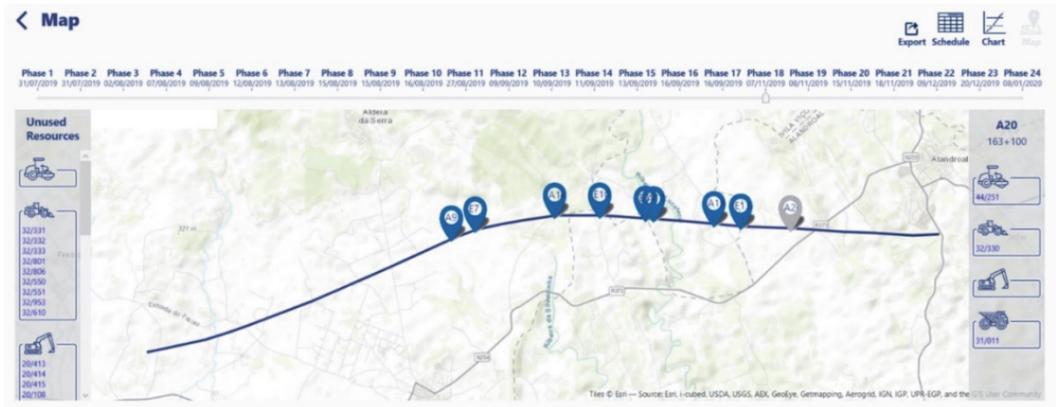


Fig. 7 – *Print screen* do sistema relativo à visualização da alocação correspondente à Solução 6 para a fase de obra 18 em formato de mapa.

material inicial e final dessa frente de trabalho de escavação nessa fase, enquanto o seu declive é função da produtividade da equipa ativa correspondente (i.e., quando maior o declive, maior a produtividade). Para cada escavação, a primeira e a última célula que contém um gráfico local começa em zero (todo o volume de material está disponível) e termina quando o gráfico de linha atinge o topo da célula (nenhum volume está disponível, uma vez que o volume restante de geomaterial na frente de escavação é nulo). Assim, é possível traçar a evolução do volume de escavação ao longo das fases até que nenhum volume de escavação esteja disponível. Em algumas

situações, a mesma frente de trabalho de escavação pode fornecer material para várias frentes de trabalho de aterro na mesma fase. Assim, e como cada frente de trabalho de aterro é representada por um gráfico de linhas, essa célula (que representa as frentes de trabalho de aterro que estão a ser abastecidas por essa frente de trabalho de escavação) tem várias linhas, sendo cada linha representativa da evolução do volume dessa frente de trabalho de escavação.

3.3 – Fase de construção

3.3.1 – Monitorização dos recursos ativos

Uma vez iniciado o processo de construção, e tendo sido garantidas as condições de transmissão de dados no estaleiro (plataforma de IoT), os dados dos equipamentos são recolhidos a partir dos sensores GPS instalados e transmitidos ao utilizador através do *dashboard*. Este último é personalizável, sendo que na Figura 8 estão demonstrados o somatório do volume total vs. restante de todas as frentes de trabalho, assim como a comparação entre as produtividades prevista vs. medida (pelo processamento dos dados de GPS) para cada frente de compactação. É importante referir que, à data da elaboração deste trabalho, não estavam ainda dados disponíveis relativamente ao processo de execução da obra, pelo que a presente Secção 3.3 corresponde a uma fase de construção simulada através de bases de dados dinâmicas apoiadas por um *script* de transmissão de dados sintéticos (i.e., os dados foram previamente gerados sinteticamente e são enviados para as bases de dados dinâmicas do sistema ao longo do tempo de modo a simular a entrada de dados de sensores ao segundo). Esta aquisição de dados dos equipamentos em tempo real é necessária para a utilização do módulo de construção do sistema, uma vez que o mesmo depende da capacidade de monitorizar e quantificar o número de ciclos realizados por cada camião ao longo do tempo, fornecendo assim uma estimativa da sua produtividade através do volume transportado. Como anteriormente mencionado, é também com base nestes dados que se torna possível calcular a

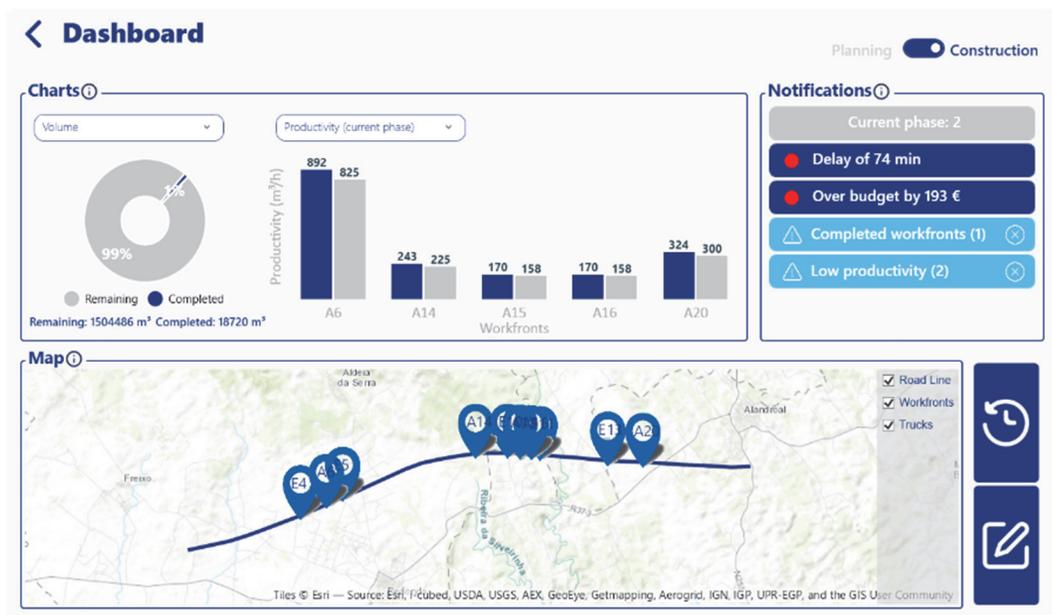


Fig. 8 – Print screen do sistema relativo ao *dashboard* correspondente à fase de execução do projeto (simulada)

produtividade das equipas de escavação às quais é atribuído o equipamento de transporte durante o ciclo de carga, bem como das equipas de compactação que recebem o material escavado.

O *dashboard* permite ainda aceder ao módulo de histórico e à função de edição manual das características do projeto. Esta última opção permite efetuar revisões ou ajustes ao planeamento atual, tais como a disponibilidade de equipamento (uma vez que alguns equipamentos podem a qualquer momento deixar de estar disponíveis devido a avaria), ou alterações relativas às frentes de trabalho (incluindo alterações aos tipos e/ou volumes de geomateriais disponíveis nas frentes de trabalho, uma vez que podem ser diferentes dos previstos nos estudos geotécnicos), ou a atualização da produtividade dos equipamentos no seguimento dos levantamentos topográficos mensais realizados em obra. Dependendo do tipo de edições às características do projeto realizadas, o sistema avalia o seu impacto no planeamento atual e recalcula os custos e duração em cada fase subsequente para as novas condições de trabalho, transmitindo ao utilizador esta informação em formato de relatório. Neste ponto, o utilizador tem a alternativa de continuar com o planeamento atual, aceitando as novas previsões de custos e duração, ou solicitar ao sistema uma re-otimização/re-alocação dos recursos para as fases restantes do projeto, como será detalhado com maior pormenor na Secção 3.3.2.

Como mencionado anteriormente, um tipo de edição que se prevê ser utilizado periodicamente (e.g., mensalmente) por parte de uma empresa de construção de obras de terraplenagem está relacionado com a retificação dos volumes atuais de escavação e aterros no seguimento do controlo topográfico periódico. Estas medições e correções são um procedimento comum nas obras de terraplenagem para o controlo da qualidade, a fim de avaliar o seu progresso e tentar mitigar desde logo qualquer potencial perturbação. Uma vez que é possível medir diretamente, por meio dos levantamentos topográficos, a quantidade de volume escavado na realidade, estes valores podem ser comparados com os estimados pelo sistema, que são calculados com base na capacidade de carga dos camiões alocados e respetivo número de ciclos. Assim, para retificar a diferença entre a média de material escavado transportado pelos camiões e a capacidade máxima assumida dos equipamentos de transporte, é atribuído à produtividade destes últimos um fator de eficiência, k (à semelhança do que se verifica no cálculo convencional da produtividade de equipamentos de escavação, espalhamento e compactação), que corresponde ao rácio entre o volume real de material escavado, resultante dos levantamentos topográficos, e o valor estimado pelo sistema através do número de ciclos e capacidade de cada camião. Neste caso foi realizada uma atualização desta natureza, na qual foram ajustados ligeiramente os volumes de escavação e aterro, para os quais o sistema calcula numa primeira fase os novos custos e durações para os novos volumes de material mantendo a solução de alocação atual. Na sequência da atualização destes aspetos, cabe ao utilizador decidir, com base num relatório apresentado pelo sistema correspondente ao efeito da atualização no custo e duração da obra (i.e., assumindo a alocação atualmente ativa), se deve prosseguir com a alocação atual ou re-otimizar e obter um novo conjunto de soluções ótimas para as novas condições de trabalho. Para o efeito deste caso de estudo, optou-se, nesta fase da simulação, por manter a alocação atual e dar continuidade aos trabalhos, sendo que na Secção 3.3.2 será demonstrado uma outra situação na qual se solicita ao sistema que providencie novas soluções por meio de re-otimização dos recursos para as fases de trabalho restantes.

3.3.2 – *Re-otimização dos recursos disponíveis*

Em qualquer construção, apesar de todo o planeamento e medidas de controlo de qualidade, podem ocorrer imprevistos que alterem significativamente as condições de trabalho das equipas ativas, sendo necessária uma nova avaliação da alocação de recursos de modo a garantir que os trabalhos continuam com eficiência máxima. Uma das situações imprevisíveis mais comuns nas obras de terraplenagens é a avaria do equipamento, que leva à impossibilidade de utilização do

mesmo. Outras alterações razoavelmente comuns prendem-se com a adição de novas frentes de trabalho (e.g., frentes de empréstimo) para apoiar ou completar um aterro em curso. Como descrito na secção anterior (Secção 3.3.1), é possível ao utilizador realizar este tipo de alterações ou ajustes a qualquer momento, sendo posteriormente confrontado com a decisão de re-otimizar os recursos disponíveis. É de notar que, em certos casos, as edições efetuadas às condições de trabalho são suficientes para tornar a solução de alocação de recursos original numa solução inviável. Um exemplo intuitivo de uma edição deste género pode verificar-se em casos em que a avaria de um equipamento deixa uma frente de trabalho supostamente ativa sem nenhum recurso a trabalhar (resultando num tempo de execução infinito para aquela frente de trabalho). O caso apresentado na Figura 9 é consistente com este tipo de situação, em que uma avaria no camião 75 deixou uma linha de produção sem capacidade de transporte de geomateriais entre as frentes de escavação e compactação correspondentes.

Seja nos casos, como o aqui simulado, em que a re-otimização é uma ação necessária para a continuação dos trabalhos, seja em casos em que a re-otimização é solicitada pelo utilizador para consultar um grupo de potenciais novas soluções que possam mitigar algum atraso, o algoritmo usado pelo sistema para os processos de re-otimização apresenta uma diferença essencial comparativamente ao algoritmo de otimização utilizado em fases de planeamento. De facto, apesar dos parâmetros de otimização serem os mesmos utilizados originalmente e de os mesmos objetivos de minimização (neste caso, custo e duração) serem tomados em conta, o algoritmo de re-otimização inclui sempre um objetivo de minimização adicional, denominado RAD (*Re-Allocation Disruption*). Como mencionado na Secção 2, a função deste terceiro objetivo de otimização é a minimização da disrupção introduzida nos trabalhos resultante da re-alocação dos equipamentos da sua frente atual para uma nova frente de trabalho. O RAD é sempre calculado em comparação a uma solução ativa anterior, sendo o seu valor obtido através da normalização da distância de deslocação do equipamento em causa entre a frente atual e a frente sugerida pela nova solução (em relação a uma distância mínima uniformizada, que neste caso se considerou 100m). Assim, um valor elevado de RAD pode significar que muitos recursos estão a ser realocados, ou alternativamente que alguns dos recursos que estão a ser realocados estão a mover-se a longas distâncias, o que pode significar um maior espaço de tempo em que estes equipamentos não só estão efetivamente inativos, como podem estar a causar obstáculos ao funcionamento normal dos restantes equipamentos. Deste modo, ao utilizar este objetivo de minimização adicional representado pelo RAD, o sistema é obrigado a procurar as soluções que transformem a alocação atual numa alocação ótima, mas que introduzam o mínimo possível de disrupção no desenvolvimento normal dos trabalhos. Por outras palavras, o sistema procura os ajustes mínimos que permitam converter a solução atual numa solução ótima.

Após o processo de re-otimização, as soluções de re-otimização obtidas, representadas na Figura 9, são avaliadas quanto aos objetivos de minimização originais (neste caso, custo e duração), com a adição de um terceiro valor correspondente ao RAD, que representaria um eixo adicional de valores num gráfico 3D para o caso representado. Durante o desenvolvimento deste módulo, verificou-se, porém, que uma representação 2D é mais eficaz para a análise e interpretação dos resultados por parte do utilizador, permitindo uma escolha informada de uma nova potencial solução de alocação para prosseguir os trabalhos. No caso de estudo aqui descrito, optou-se por escolher uma nova solução de re-otimização correspondente à solução 15. Note-se que, para efeitos de nomenclatura e de consulta de histórico, as novas soluções obtidas são designadas por "S6.X", sendo "S6" a solução anteriormente selecionada e o "X" correspondente à nova solução escolhida a partir do processo de re-otimização, tornando a sua leitura mais simples e clara, conforme apresentado na Figura 9. Neste caso, após a seleção da solução S6.15, com um valor de RAD de 34, os processos de terraplenagem prosseguiram de acordo com o planeamento desta solução, tal como representado na Figura 10.

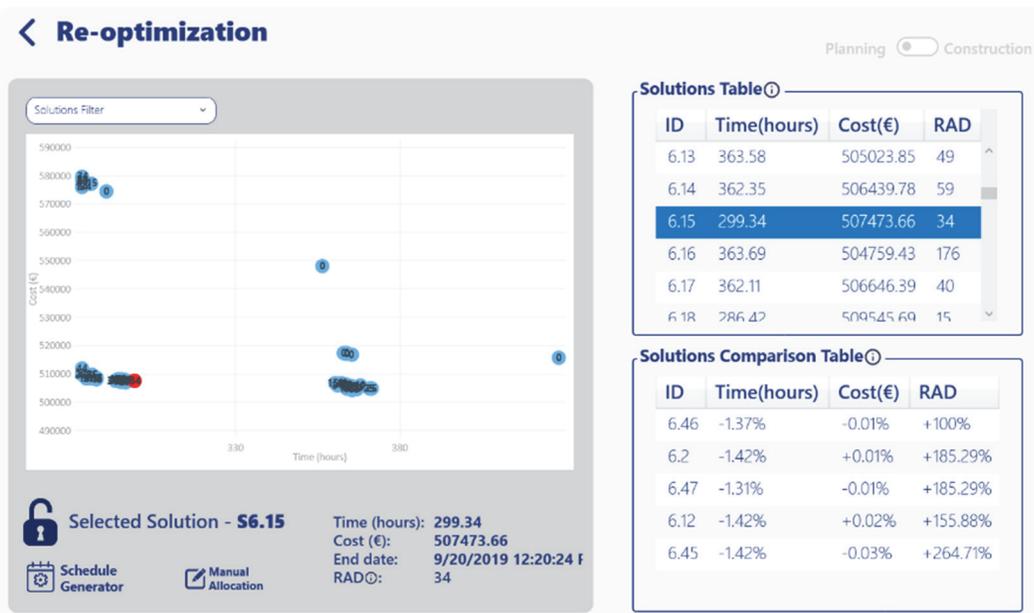


Fig. 9 – Print screen do sistema relativo à nova frente de Pareto como resultado da re-otimização de recursos, com seleção da Solução 6.15.

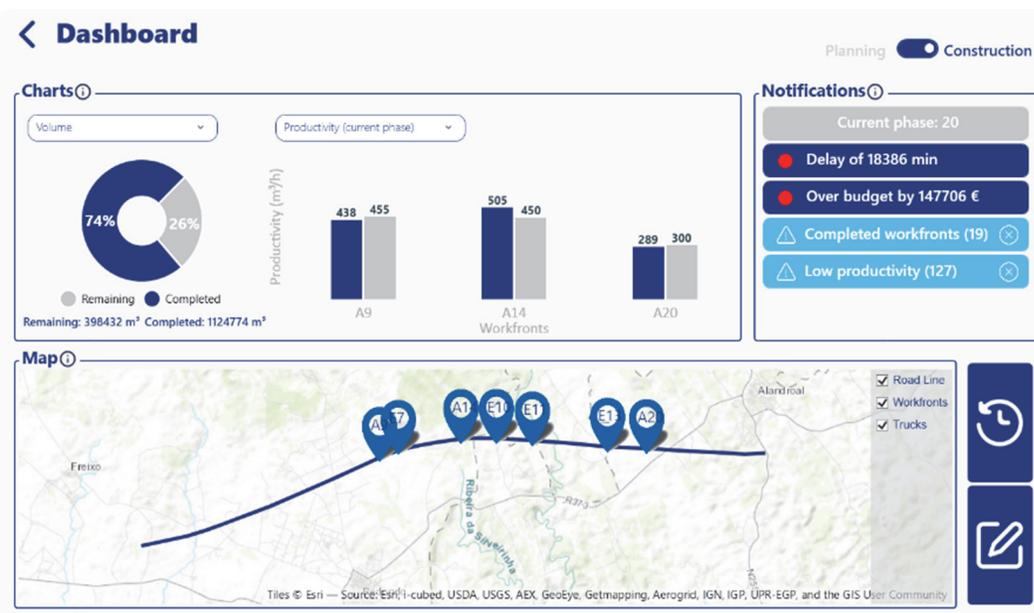


Fig. 10 – Print screen do sistema relativo ao estado atual do progresso dos trabalhos na fase de obra 20.

3.3.3 – Dados históricos

Quer seja durante uma obra ainda ativa, quer se pretenda aceder a dados de obras de terraplenagem passadas, o módulo de dados históricos apresenta a informação relevante de todos os projetos anteriores, nomeadamente soluções adotadas originalmente em fase de planeamento, notificações relevantes realizadas pelo sistema de monitorização e alarme e alterações de soluções como resultado de re-otimizações. Tal como se apresenta na Figura 11, é apresentada uma linha de tempo vertical com os marcos e edições de relevo e uma lista de notificações relevantes que tenham surgido ao longo da obra. Em cada pedido de re-otimização em que o utilizador selecionou uma nova solução é possível aceder ao planeamento detalhado tanto das soluções anteriores como das seguintes/da atual. No que diz respeito à lista de notificações, esta fornece em detalhe toda a informação relativa a cada camião e condições de produtividade. Esta informação pode ser utilizada noutro tipo de análises, tais como auditorias, análises estatísticas ou técnicas de inteligência artificial ou *machine learning*, capazes de obter novas informações e/ou padrões interessantes a partir destes dados para estudos futuros.



Fig. 11 – Dados históricos em formato de tabela

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco deste trabalho foi a exploração das vantagens de uma plataforma *digital twin* para a monitorização e otimização de processos de terraplenagens. Os objetivos foram conseguidos por meio da integração de ferramentas de IoT e de otimização, que permitem uma monitorização contínua e em tempo real das equipas de produção, levando a um apoio global à gestão e à tomada de decisão em obra de terraplenagem. Por um lado, as técnicas de otimização podem ser utilizadas durante a fase de planeamento para tentar otimizar a alocação de recursos ao longo do projeto de construção, minimizando aspetos tais como o custo e a duração, com base em dados de produtividade e custos estimados. Por outro lado, no seguimento do início da fase de execução, a

implementação de uma plataforma IoT permite monitorizar e adaptar a solução de alocação adotada na fase de projeto a novas condições imprevisíveis durante a fase de construção em tempo real.

A metodologia proposta foi simulada para um caso de estudo referente a dados reais de uma obra de terraplenagem. De facto, por consequência de limitações referentes à disponibilidade de dados do caso de estudo em questão, as fases de execução do projeto foram simuladas fazendo recurso a bases de dados dinâmicas e dados gerados sinteticamente. Não obstante, a simulação demonstrou o potencial destas tecnologias para a gestão dos trabalhos, levando a cabo a monitorização de equipamentos com recurso a sensores GPS e a técnicas de *geo-fencing*, assim como a sugestão de alterações às soluções de alocações de modo a mitigar possíveis atrasos e a garantir o progresso dos trabalhos em condições ótimas. Salienta-se que foi possível obter um plano de planeamento global para todas as fases do projeto de terraplenagem, e que o mesmo foi re-otimizado como resposta a um evento imprevisível de avaria de equipamentos (simulado). Um outro fator de inovação está na metodologia proposta para re-otimização, na qual não só se pretende manter a atividade dos equipamentos ativos o mais próximo possível da ótima, mas também se considera a perturbação induzida pela afetação do equipamento, dos custos e do tempo relacionados através da introdução de um objetivo de otimização adicional (RAD).

É de notar que, embora o sistema seja especificamente concebido para a construção de terraplenagens, também pode ser aplicado a outros tipos de construção, em especial aqueles que se apoiem fortemente em linhas de produção mecanizadas, entre as quais se pode destacar a construção de estradas, vias férreas, a manutenção e reabilitação de pavimentos, a construção de barragens e a construção de túneis. Assim, a metodologia proposta apresenta-se como uma ferramenta importante para melhorar a indústria da construção através da digitalização, acompanhando as atuais tendências da Construção 4.0 e da sustentabilidade na construção. O trabalho futuro centrar-se-á no desenvolvimento da estrutura IoT e na implementação da sensorização de equipamentos num projeto real de construção ferroviária de grande escala em curso, a fim de testar a estrutura *digital twin* desenvolvida num cenário real de construção.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT / MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da unidade de I&D Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), com referência UIDB / 04029/2020, e do Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems ARISE, com referência LA/P/0112/2020. Este trabalho tem também o cofinanciamento do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia – www.recuperarportugal.gov.pt (PRR - Investimento RE-C05-i02: Missão Interface - CoLAB).

6 – REFERÊNCIAS

- 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.
<https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Gomes Correia, A.; Cortez, P.; Tinoco, J.; Marques, R. (2013). *Artificial Intelligence Applications in Transportation Geotechnics*. Geotechnical and Geological Engineering, 31(3), pp. 861–879.
<https://doi.org/10.1007/s10706-012-9585-3>
- Gomes Correia, A.; Magnan, J.P. (2012). *Trends and challenges in earthworks for transportation infrastructures*. Adv Transp Geotech, 2 (Eds: Miura S, Ishikawa T, Yoshida N, Hisari Y, Abe N), pp. 1–12. Londres, CRC Press.

- Jassim, H.S.H.; Lu, W.; Olofsson, T. (2017). *Predicting Energy Consumption and CO₂ Emissions of Excavators in Earthwork Operations: An Artificial Neural Network Model*. Sustainability, 9, pp. 1257. <https://doi.org/10.3390/su9071257>
- Kassem, M.; Mahamedi, E.; Rogage, K.; Duffy, K.; Huntingdon, J. (2021). *Measuring and benchmarking the productivity of excavators in infrastructure projects: A deep neural network approach*. Automation in Construction, 124(January), pp. 103532. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103532>
- Lee, S.; Park, S.; Seo, J. (2018). *Utilization analysis methodology for fleet telematics of heavy earthwork equipment*. Automation in Construction, 92, pp. 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.035>
- Liu, Y.; You, K.; Jiang, Y.; Wu, Z.; Liu, Z.; Peng, G.; Zhou, C. (2022). *Multi-objective optimal scheduling of automated construction equipment using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III)*. Automation in Construction, 143, pp. 104587. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104587>
- Marques, R.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2008). *Data Mining Applied to Compaction of Geomaterials*. Eight Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields (Eds: Tutumluer, E.; Al-Qad, I.L.), 1, pp. 597-605. Londres, Taylor & Francis Group.
- Mersmann, O.; Trautmann, H.; Steuer, D. (2014). Package "mco": Multiple Criteria Optimization Algorithms and Related Functions. R package version.
- Montaser, A.; Moselhi, O. (2014). *Truck + for Earthmoving Operations*. Journal of Information Technology in Construction, 19, pp. 412–433.
- Nassar, K.; Hosny, O. (2012). *Solving the Least-Cost Route Cut and Fill Sequencing Problem Using Particle Swarm*. Journal of Construction Engineering and Management, 138 (8) , pp. 931–942. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000512](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000512)
- Parente, M.; Gomes Correia, A. (2013). *Compaction Management: Results of a Demonstration Project*. Advanced Materials Research, 779, pp. 1697-1700. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1697>
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2014). *Artificial Neural Networks Applied to an Earthwork Construction Database*. 2nd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG 2014), Durham, UK.
- 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. (2016). *Metaheuristics, data mining and geographic information systems for earthworks equipment allocation*. Advances in Transportation Geotechnics III, 143, pp. 506-513. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.064>
- 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. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1491368>
- Parente, M.; Figueira, G.; Amorim, P.; Marques, A. (2020). *Production scheduling in the context of Industry 4.0: review and trends*. International Journal of Production Research, 58 (17), pp. 5401-5431. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1718794>

- 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 (11), pp. 157. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110157>
- Salem, A.; Moselhi, O. (2020). *AI-Based Cloud Computing Application for Smart Earthmoving Operations*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48 (3), pp. 312-327. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0681>
- SETRA; LCPC (2000) *Guide des Terrassements Routiers – Réalisation des Semblais et des Couches de Forme*. Guia técnico.
- Silva, R.; Parente, M.; Neves, J. (2023). *Machine learning for the analysis of equipment sensor data in road construction projects*. Aceite na 4th International Society for Intelligent Construction (ISIC 2024), Orlando, USA.
- You, K.; Ding, L.; Zhou, C.; Dou, Q.; Wang, X.; Hu, B. (2021). *5G-based earthwork monitoring system for an unmanned bulldozer*. *Automation in Construction*, 131, pp. 103891. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103891>