

PLATAFORMA DE GESTÃO DE INFORMAÇÃO E MONITORAMENTO PARA INSTALAÇÕES MINEIRAS

Jeniffer Viegas ⁽¹⁾, Gonçalo Tavares ⁽¹⁾

(1) TPF Consultores de Engenharia e Arquitetura, Lisboa, 0009-0000-5679-7002

Resumo

No âmbito de um projeto de engenharia de longo curso numa instalação industrial da área mineira, foi desenvolvida uma plataforma digital para a organização e gestão de informação, complementada pelo monitoramento da instrumentação da obra. Esta solução é essencial para lidar com a complexidade inerente à gestão de grandes empreendimentos e à necessidade de uma compreensão clara do estado e evolução da infraestrutura.

A plataforma está apta a lidar com uma diversidade de tipos de dados, incluindo registos de instrumentação e informação geoespacial detalhada do local. A visualização e análise espacial é centralizada em dashboards construídos em ArcGIS, que oferecem ferramentas avançadas para a interpretação e interação rápida do utilizador com os dados georreferenciados.

Para além da componente espacial, um segundo dashboard do tipo relatório, desenvolvido em Power BI, permite o tratamento aprofundado dos dados, apresentando indicadores-chave de desempenho e resumos analíticos. As funcionalidades incluem a visualização do estado da instrumentação e resultados de ensaios, bem como a apresentação da evolução 3D da superfície do local de estudo.

Neste momento, a atualização dos dados é feita de forma periódica, com uma frequência mensal. Contudo, o desenvolvimento futuro da plataforma prevê a transição para um sistema de monitoramento em tempo real (IoT), permitindo uma gestão mais proativa e a resposta célere a potenciais eventos. Esta solução aprimora a gestão de risco e o acompanhamento da fase de implementação e operação da instalação mineira.

1. Introdução

A indústria mineira enfrenta desafios crescentes relacionados com a segurança, sustentabilidade e eficiência operacional. A monitorização contínua de infraestruturas mineiras, particularmente através de instrumentação geotécnica, constitui uma prática essencial para garantir a estabilidade de estruturas críticas e a prevenção de eventos catastróficos. No entanto, a gestão

eficaz dos volumes massivos de dados gerados por estas atividades permanece um desafio significativo para muitas organizações.

A necessidade de plataformas integradas que consolidem diferentes tipologias de dados tem ganho relevância crescente na literatura técnica e na prática industrial. A fragmentação de informação constitui um dos principais obstáculos à tomada de decisão eficaz em projetos complexos, onde dados geotécnicos, topográficos, estruturais e operacionais devem ser analisados de forma conjunta para proporcionar um bom conhecimento da estrutura. Necessitamos de saber qual o comportamento esperado de cada interveniente para percebermos o impacto individual e conjunto na estrutura e assim identificar um comportamento, dito anómalo.

A aplicação de sistemas de informação geográfica (SIG) na indústria mineira tem sido amplamente documentada como uma ferramenta essencial para a gestão espacial de dados. Os SIG permitem a integração de múltiplas camadas de informação georreferenciada, facilitando a análise espacial e a identificação de padrões que seriam difíceis de perceber através de métodos convencionais. Muitas vezes, padrões são mascarados ou mesmo ocultados quando analisamos dados de forma isolada, mas ao sobrepor vários tipos de dados podemos ter uma perspetiva diferente do problema, e visualizar possíveis correlações antes dissolvidas na individualidade de cada dataset.

No domínio específico da monitorização geotécnica, a instrumentação tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Sistemas tradicionais baseados em leituras manuais têm dado lugar a soluções progressivamente mais automatizadas, com sensores dotados de capacidades de transmissão de dados em tempo real. Esta evolução é particularmente relevante em estruturas de risco elevado, onde antecipar possíveis catástrofes é fundamental, e cada segundo conta.

A literatura técnica tem destacado o conceito emergente de "digital twin" ou gémeo digital aplicado a infraestruturas, onde modelos virtuais espelham em tempo real o estado físico de estruturas reais. Esta abordagem, quando combinada com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e análise preditiva, permite não apenas monitorizar o estado atual de uma infraestrutura, mas também prever o seu comportamento futuro sob diferentes cenários operacionais.

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos e metodológicos, persiste uma lacuna entre as capacidades disponíveis e a sua implementação prática. Diversas plataformas comerciais têm surgido para colmatar esta necessidade, como o Orbow [1], Proqio [2] e TerraWeb [3], no entanto, sendo software proprietário, apresentam limitações ao nível da flexibilidade, personalização e integração com outros sistemas. Adicionalmente, os custos de licenciamento podem ser proibitivos para organizações de menor dimensão. A literatura académica e técnica tem também enfatizado a importância de abordagens open-source como alternativa às soluções proprietárias. Ferramentas como QGIS, PostgreSQL/PostGIS, e diversas bibliotecas Python para análise geoespacial oferecem capacidades comparáveis a soluções comerciais, com a vantagem adicional de total controlo sobre o código, ausência de custos de licenciamento e possibilidade de personalização ilimitada.

O presente artigo descreve a conceção, desenvolvimento e implementação de uma Plataforma de Gestão de Informação (PGI) aplicada a um projeto de engenharia de longo curso numa instalação mineira com mais de 40 anos de operação. Esta instalação apresenta uma complexidade significativa, com aproximadamente 71 ensaios CPTu (Cone Penetration Test with pore pressure measurement) e mais de 900 instrumentos geotécnicos ativos.

O volume de dados gerado é considerável: assumindo uma frequência média de leitura diária para os instrumentos (embora alguns registem leituras horárias e outros semanais ou mensais), poderíamos estimar que estamos perante cerca de 14 milhões de registos ao longo da vida da instalação. Esta escala torna imprescindíveis a organização, estruturação e processamento sistemático dos dados para gerar informação útil, que por sua vez fundamenta decisões técnicas com impacto direto na segurança da estrutura e do ambiente circundante. Sem uma plataforma adequada, este património informacional transforma-se num obstáculo em vez de um ativo, com dados dispersos, inacessíveis e subutilizados.

A estruturação e normalização desta enorme quantidade de dados mostraram-se um ponto crítico para o desenvolvimento deste trabalho. Desta forma, investigaram-se alguns métodos de normalização de dados, e optou-se por seguir com o formato AGS - Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists [4], por se encontrar numa fase madura de desenvolvimento e com acompanhamento. O AGS é um formato comum na geotecnia para a transferência de dados geotécnicos, facilitando a interoperabilidade entre diferentes sistemas e reduzindo erros na transferência de informação. A adoção deste tipo de normalização tem-se revelado fundamental para garantir a qualidade e integridade dos dados ao longo do ciclo de vida de projetos de engenharia, que por vezes podem ser bastante longos.

As principais contribuições deste trabalho incluem:

- Estruturação de informação geotécnica de forma normalizada (AGS) e inserida numa base de dados relacional (PostgreSQL).
- Descrição detalhada de uma arquitetura integrada para gestão de dados geotécnicos, combinando componentes espaciais (ArcGIS) e analíticos (Power BI);
- Implementação de workflows automatizados para processamento de dados de instrumentação e ensaios de campo;
- Desenvolvimento de soluções de visualização 3D e análise temporal de dados geoespaciais;

2. Arquitetura da plataforma

2.1. Visão geral e princípios de design

A Plataforma de Gestão de Informação (PGI) foi concebida segundo princípios de modularidade, escalabilidade e flexibilidade. A arquitetura assenta numa separação clara entre as camadas de dados, processamento e visualização, permitindo a evolução independente de cada componente sem comprometer a integridade do sistema global.

Apesar de ter-se optado por software proprietário como o ArcGIS para a componente geoespacial e user interface (frontend), a arquitetura foi desenhada de forma a que pudesse ser reimplementada com ferramentas opensource, tais como QGIS, PostGIS, Mapbox, Leafmap ou outras aplicações abertas, uma vez que a parte essencial (o backend) de todo o projeto foi efetuada em opensource com recurso do PostgreSQL para gestão dos dados e do Python para processamento e análise. A decisão de utilizar ArcGIS baseou-se na sua prévia utilização na organização no âmbito de outros projetos, permitindo assim otimizar o aproveitamento do licenciamento já existente e reduzir a curva de aprendizagem da equipa técnica.

2.2. Workflow de processamento de dados

A Figura 1 ilustra o workflow utilizado para o desenvolvimento de uma aplicação da plataforma, especificamente o dashboard de instrumentação geotécnica.



Figura 1: Workflow para o desenvolvimento do dashboard de instrumentação.

O processo inicia-se com a aquisição automática através de uma “scheduled task” dos dados de instrumentação a partir de uma pasta partilhada no SharePoint, onde o cliente deposita mensalmente os ficheiros com as leituras dos instrumentos. Esta abordagem, embora funcional, representa uma solução intermédia. Idealmente, o sistema deveria estabelecer ligação direta aos instrumentos de medição, permitindo a captura de dados em tempo real. No entanto, por questões de permissões e restrições de acesso impostas pelo cliente, esta otimização não foi ainda implementada.

Os dados brutos de instrumentação são processados através de scripts desenvolvidos em Python, que executam as seguintes operações:

- Validação e limpeza: Identificação e tratamento de valores anómalos, dados em falta ou inconsistências;
- Normalização: Conversão para o formato AGS.
- Carregamento: Inserção dos dados normalizados numa base de dados PostgreSQL, que serve como repositório central de toda a informação do projeto.

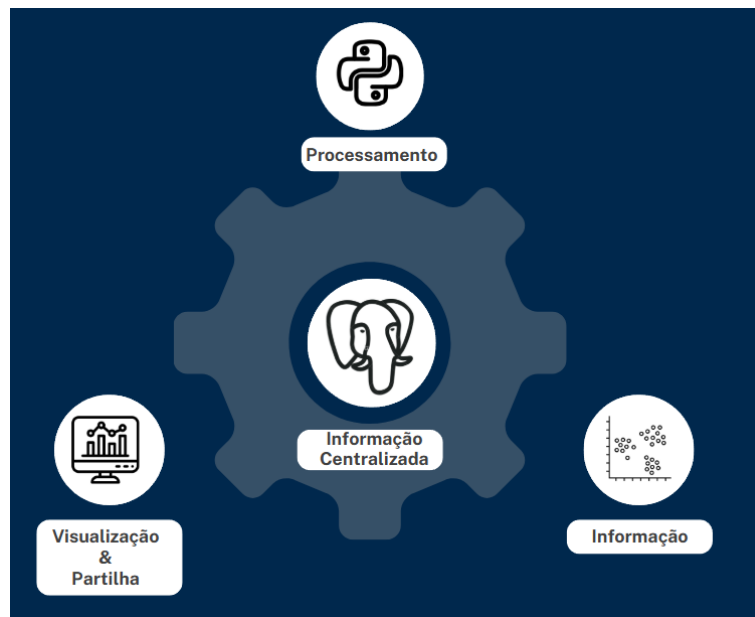


Figura 2: Centralização e integridade dos dados.

A partir do momento em que temos toda a informação centralizada, como exibido na Figura 2, passamos a ter o nosso processamento (códigos em qualquer linguagem) a ser alimentado pela única fonte fidedigna de informação, não temos mais problemas tais como: Qual o ficheiro Excel com a informação mais atual? Quem tem esse ficheiro? De que forma foi alterado? Posso confiar nestes dados? Assim, passamos a produzir informações uniformes e verificadas, que, por sua vez, são utilizadas para diversas aplicações.

2.3. Geração de informação e conhecimento

Após o carregamento dos dados brutos na base de dados, executa-se uma segunda fase de processamento orientada para a geração de informação analítica. Nesta etapa são criados:

- Gráficos históricos: Séries temporais representando a evolução de parâmetros medidos (deslocamentos, pressões intersticiais, cargas, etc.), permitindo a identificação de tendências e anomalias;
- Análises comparativas: Sobreposição de múltiplos instrumentos para identificar comportamentos correlacionados ou divergentes;
- Visualizações espaciais: Mapas de calor e interpolações espaciais que permitem identificar zonas críticas;
- Relatórios automatizados: Geração programática de documentos PDF padronizados contendo a análise mensal de cada instrumento.

A informação processada é então carregada numa aplicação web, onde cada ponto no mapa representa um instrumento geotécnico. Ao clicar num instrumento específico, o utilizador acede imediatamente a toda a informação tratada, como por exemplo o histórico de leituras e gráficos de evolução. A Figura 2 ilustra algumas páginas da PGI.



Figura 2: Ilustração de páginas da PGI – a) Dashboard da instrumentação; b) Ilustração da topografia primitiva e ensaios CPTu em ambiente 3D; c) Relatório Power BI embebido na aplicação com tratamento analítico de CPTus.

2.4. Integração de ensaios de campo

Grande parte do processo descrito é replicada para ensaios de campo, particularmente CPTu (Cone Penetration Test with pore pressure measurement). Estes ensaios geotécnicos fornecem informação contínua sobre as propriedades do solo em profundidade, incluindo resistência de ponta, atrito lateral e pressão intersticial.

No caso dos CPTus, os dados são processados apenas quando há uma nova campanha de ensaios, uma vez que constituem informação estática que não se altera após a interpretação inicial. Para melhorar a visualização e análise destes dados, foi desenvolvido um dashboard específico em Power BI, embebido na página online da PGI. Esta decisão justifica-se pela complexidade e pelo volume de informação associados aos CPTus, que requerem ferramentas analíticas mais sofisticadas do que as disponíveis nativamente em plataformas de mapeamento web. Entre as funcionalidades do dashboard para os ensaios CPTus podemos citar a visualização simultânea de vários ensaios para comparação estratigráfica assim como a determinação de parâmetros do solo seguindo diferentes metodologias.

2.5. Funcionalidades avançadas da plataforma

Além da instrumentação geotécnica e dos ensaios de campo, a plataforma contempla funcionalidades adicionais essenciais para uma gestão do projeto:

i) Visualização 3D e Contexto Geográfico

A plataforma integra capacidades avançadas de visualização tridimensional, incluindo:

- Modelos 3D de base derivados de OpenStreetMap 3D e imagens de satélite;
- Topografias correspondentes a diferentes fases da vida da estrutura, permitindo análise de evolução morfológica assim como o estudo de deslocamentos verticais.
- Visualização dos perfis de ensaios CPTu em contexto tridimensional, facilitando a compreensão da distribuição espacial das propriedades do solo;

ii) Gestão Documental

Um repositório estruturado de documentação técnica está integrado na plataforma, incluindo:

- Relatórios técnicos e memórias descritivas relevantes para a estrutura;
- Desenhos de projeto e as-built essenciais;
- Especificações técnicas de instrumentação;

Esta componente de gestão documental, embora aparentemente simples, revela-se crítica em projetos de longo curso, onde o conhecimento institucional pode perder-se com a rotação de equipas técnicas. Está ainda a ser implementado o acesso aos registos fotográficos georreferenciados de inspeções visuais.

3. Evolução futura: IoT e monitorização em tempo real

3.1. Limitações do Sistema Atual

Neste momento, a atualização dos dados é feita de forma periódica, com uma frequência mensal. Este regime apresenta limitações significativas:

1. Latência na deteção de eventos: Anomalias que ocorram entre ciclos de leitura podem não ser detetadas atempadamente;
2. Intervenção manual: O processo de upload de ficheiros pelo cliente introduz possibilidades de erro humano e atrasos;
3. Granularidade temporal limitada: A frequência mensal pode ser insuficiente para compreender processos dinâmicos ou prever eventos críticos.

3.2. Visão para sistema IoT

O desenvolvimento futuro da plataforma prevê a transição para um sistema de monitorização em tempo real baseado em tecnologias IoT. Esta evolução passará pela substituição progressiva dos sensores tradicionais de leitura manual por sensores inteligentes com transmissão automática de dados, alimentados de forma autónoma e comunicando através de protocolos sem fios como LoRaWAN, NB-IoT ou redes celulares. A arquitetura de rede assentará em gateways locais para agregação de dados, com redundância de comunicações e mecanismos de

segurança cibernética que garantam a integridade e continuidade do sistema. Do ponto de vista analítico, esta transição permitirá a deteção de anomalias em tempo real através de algoritmos de machine learning, a emissão de alertas automáticos com diferentes níveis de severidade, e a análise preditiva do comportamento da estrutura, antecipando eventos críticos antes da sua materialização. A manutenção da própria instrumentação beneficiará igualmente desta evolução, com a identificação automática de sensores com desempenho degradado ou comportamento anómalo.

3.3. Impacto na gestão de risco

Esta solução aprimora significativamente a gestão de risco e o acompanhamento das fases de implementação e operação da instalação mineira. A transição de uma abordagem reativa para proativa permite a antecipação de eventos críticos, possibilitando intervenções preventivas antes da materialização de falhas. Simultaneamente, promove a otimização de recursos, concentrando esforços de inspeção e manutenção nas áreas que efetivamente o requerem, o que se traduz na redução de custos operacionais através da deteção precoce de problemas quando as intervenções são ainda menos dispendiosas. A melhoria da segurança constitui outro benefício fundamental, reduzindo a exposição de pessoal a ambientes potencialmente perigosos através de monitorização remota. Por fim, esta abordagem facilita a conformidade regulamentar, garantindo a demonstração objetiva do cumprimento de requisitos de monitorização contínua impostos pelas autoridades competentes.

4. Conclusões

Este caso de estudo representa, na realidade, um protótipo de uma visão mais ampla: uma geodatabase completa e bem estruturada onde toda a informação está organizada e facilmente acessível. Queremos com este trabalho responder a questões fundamentais: Como automatizar a recolha de dados? Como partilhar informação de forma organizada? Como monitorizar estruturas de perto? Como visualizar eficazmente toda a informação disponível? O fluxo de trabalho proposto – analisar cuidadosamente todos os ficheiros disponíveis, criar rotinas de automatização, processar dados para gerar informação, e partilhar esta informação de forma envolvente através de dashboards e plataformas web – constitui uma metodologia replicável e escalável. A filosofia subjacente é clara: uma plataforma para cada projeto, onde toda a informação é consolidada. Esta abordagem permite rastreabilidade completa, acessibilidade universal, consistência de processos e reutilização de dados para múltiplos propósitos – desde visualizações e relatórios dinâmicos até modelos de machine learning.

A conclusão fundamental que se impõe é inequívoca: manter dados estruturados e organizados para gerar melhor informação deve ser um objetivo central de qualquer organização. O passo mais difícil é sempre o primeiro – estruturar todos os dados numa base de dados. A partir daí, o potencial é ilimitado.

A cadeia de valor Dados → Informação → Conhecimento → Decisão → Segurança não é apenas um conceito teórico, mas uma realidade operacional que se materializa através de plataformas bem concebidas. Em contextos de estruturas de risco, como instalações mineiras, esta cadeia tem implicações diretas na segurança de pessoas, estruturas e do ambiente.

A qualidade dos dados será sempre um fator crítico, uma vez que a utilidade da plataforma depende diretamente da qualidade, consistência e atualidade dos dados inseridos – como se diz,

"garbage in, garbage out". Plataformas desta natureza não são produtos estáticos, requerem uma atenção contínua, para introdução de dados e manutenção da plataforma, o que significa que será sempre um projeto em andamento, com mais ou menos maturidade.

A partilha desta experiência com a comunidade técnica pretende contribuir para o avanço coletivo do setor, inspirando projetos semelhantes e promovendo o debate sobre as melhores práticas em gestão digital de infraestruturas complexas. A transformação digital na engenharia civil e mineira não é apenas uma questão tecnológica, mas também organizacional e cultural. O desafio está lançado: estruturar, automatizar, visualizar e decidir com base em dados. O futuro da engenharia passa, inequivocamente, pela digitalização inteligente – uma digitalização que serve o propósito fundamental da engenharia: garantir segurança, eficiência e sustentabilidade das infraestruturas que suportam a nossa sociedade.

Referências

- [1] Orbow, "Geotechnical Data Management Platform," Orbow. [Online]. Available: <https://www.orbow.com>. [Accessed: Feb. 12, 2026].
- [2] Proqio, "Mining Operations Management Software," *Proqio*. [Online]. Available: <https://www.proqio.com>. [Accessed: Feb. 12, 2026].
- [3] TerraWeb, "Geotechnical Information Management System," *Encardio*. [Online]. Available: <https://www.encardio.com>. [Accessed: Feb. 12, 2026].
- [4] Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (AGS), "AGS Data Format," *AGS*. [Online]. Available: <https://www.ags.org.uk>. [Accessed: Feb. 12, 2026].