

USO DE BANCOS DE DADOS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA OTIMIZAR INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS EM ESTRUTURAS DE REJEITOS

Rafael PITON¹; Marieli BIONDO ²; Ezequias OLIVEIRA ³ e Darlis DEVISE ⁴

Resumo – Os dados geotécnicos frequentemente não são armazenados de forma adequada, dificultando seu uso em diferentes projetos e gerando repetição de sondagens devido à falta de rastreabilidade e confiabilidade das informações. Nos últimos três anos, foram realizados e armazenados mais de 200 quilômetros de perfuração e mais de 10 mil ensaios em estruturas geotécnicas de mineração, com maior ênfase as que passaram por projetos de As Is e Descaracterização. Para garantir a velocidade necessária no planejamento e execução de todas as campanhas geotécnicas, foi implementado um processo automatizado de organização de dados técnicos, gerando números identificadores únicos para cada sondagem, que são posteriormente depositados nos bancos de dados geocientíficos oficiais. Todos esses dados também são espacializados em mapas, no mesmo processo automatizado, atualizados diariamente com o status da execução das perfurações, gerando dados de gestão que também são armazenados em banco de dados com o mesmo número de identificação de cada sondagem. Com a organização de todo o volume de dados gerados e estabelecendo processos de governança para certificar a qualidade das informações, foi possível promover a integração entre bancos de dados e reutilizar as sondagens já executadas em projetos futuros. Mais de 5 quilômetros de perfuração geotécnica, em estruturas de rejeitos, foram reduzidos ao longo de 2024, permitindo acelerar os projetos críticos da empresa para os próximos anos. Uma nova etapa de automação de processos está sendo implementada com o objetivo de integrar outros bancos de dados existentes com informações ambientais e geológicas, apoiadas por inteligência artificial que consumirá todos os dados existentes, combinando-os e lançando-os diretamente em modelos para que análises de engenharia possam ser realizadas durante a execução das campanhas, aumentando a assertividade dos valores característicos utilizados nos projetos.

Abstract – Geotechnical data is often not stored adequately, making it difficult to use in different projects and causing repetition of drillings due to the lack of traceability and reliability of the information. Over the past three years, more than two hundred kilometers of drilling and over ten thousand tests on geotechnical mining structures have been conducted and stored, with a greater emphasis on those that underwent As Is and Decharacterization projects. To ensure the necessary speed in planning and executing all geotechnical campaigns, an automated process for organizing technical data was implemented, generating unique identifying numbers for each geotechnical drilling, which are subsequently deposited in official geoscientific databases. All this data is also spatialized in maps, in the same automated process, updated daily with the status of drilling execution, generating management data that is also stored in a database with the same identification number for each borehole. By organizing the entire volume of generated data and establishing governance processes to certify the quality of the information, it was possible to promote integration between databases and reuse already executed geotechnical drillings in future projects. More than five kilometers of geotechnical drilling in tailings structures were reduced throughout 2024, allowing

¹ Geociências e Sondagem, VALE S.A., (49) 99905-0020, Rafael.Piton@vale.com

² Geociências e Sondagem, VALE S.A., (49) 99177-2067, marieli.biondo@vale.com

³ Geociências e Sondagem, VALE S.A., (47) 98445-7376, Ezequias.Oliveira@vale.com

⁴ Geociências e Sondagem, CONCREMAT ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES, (48) 99851-8029, C0701140@vale.com

the company's critical projects to be accelerated for the coming years. A new stage of process automation is being implemented with the aim of integrating other existing databases with environmental and geological information, supported by artificial intelligence that will consume all existing data, combine it, and launch it directly into models so that engineering analyses can be carried out during the execution of campaigns, increasing the assertiveness of the characteristic values used in the projects.

Palavras-Chave – Investigações Geotécnicas, Otimizações, Sondagem, Governança de Dados e Inteligência Artificial.

1. INTRODUÇÃO

As barragens e instalações de empilhamento a seco são essenciais para a gestão de rejeitos e proteção ambiental nas atividades mineradoras. No entanto, o Brasil enfrentou crises de segurança com o rompimento das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), resultando em perdas humanas e danos ambientais significativos. Em resposta, foram implementadas reformas regulatórias, como a Lei 12.334 de 2010 e a Lei 14.066 de 2020, que introduziram exigências rigorosas para garantir a integridade estrutural das barragens e a proteção das comunidades e do meio ambiente.

Diante disso, a demanda por investigações geotécnicas aumentou, refletindo a necessidade de monitorar e avaliar continuamente a estabilidade dessas estruturas. A Vale S.A. adotou práticas inovadoras para otimizar suas campanhas de sondagem, utilizando tecnologias modernas e planejamento estratégico rigoroso para a coleta e análise de dados geotécnicos.

Este artigo explora as práticas atuais de investigações geotécnicas, destacando metodologias, organização das campanhas de sondagem, otimizações de planos de sondagem e governança dos dados. Além disso, aborda a importância da integração de dados históricos e da implementação de sistemas de qualidade para garantir a confiabilidade das informações obtidas. O objetivo é promover a segurança das estruturas de rejeitos, proteger vidas humanas e minimizar os impactos ambientais associados à mineração.

2. INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS: PLANEJAMENTO E DADOS

2.1. Programação de Sondagens Geotécnicas

A previsão anual de execução de sondagens geotécnicas na Vale S.A. é de cerca de 100 km, um volume significativamente maior comparado a outras áreas de projetos estruturais e geotécnicos. O planejamento das demandas é uma fase crucial para a Companhia. Grande parte das sondagens é realizada com sondas mistas, incluindo ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), extração de amostras para ensaios laboratoriais, sCPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) e ensaios de infiltração *in situ* para determinar coeficientes de permeabilidade.

Silva e Santos (2023) destacam que as investigações geotécnicas em barragens de rejeitos enfrentam desafios significativos, exigindo inovações contínuas para garantir a segurança e a eficiência. Atualmente, mais de 15 empresas de sondagem geotécnica, regionalizadas nos estados de Minas Gerais e Pará, atendem a Vale S.A. com um total de 112 equipamentos, servindo a mais de 13 clientes internos, como Descaracterização de Barragens, Projetos Geotécnicos, Geotecnia Operacional e Projeto Capital. Para 2025, estão programados 77 km de sondagem geotécnica em estruturas de rejeitos, dos quais pouco mais de 21 km já foram executados.

Para organizar e efetivar o planejamento, os clientes internos mapeiam suas demandas no ano anterior e solicitam via aplicativo interno, anexando os documentos de engenharia necessários, como Especificações Técnicas. A equipe de sondagem geotécnica avalia o cadastro em dez etapas: Análise Preliminar, Orçamento, Engenharia, Mapas e GIS, Operação de Sondagem, Topografia, Meio Ambiente, Infraestrutura, Planejamento Estratégico e Banco de Dados. A Figura 1 apresenta o aplicativo de demanda interna da geotecnia e workflow de aprovação.

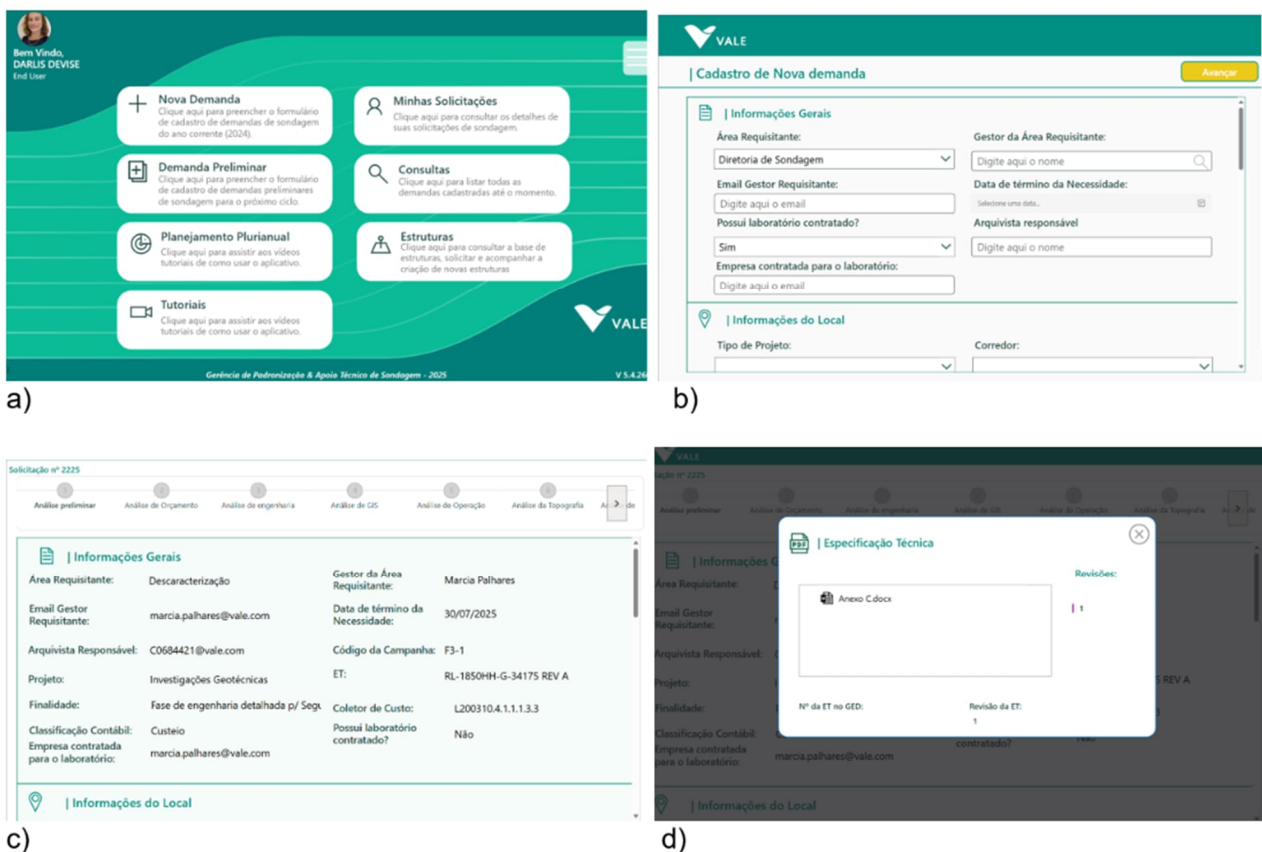


Figura 1 Aplicativo de abertura de demandas de sondagem geotécnica (PowerApps, Microsoft®): a) Página de abertura; b) Cadastro da demanda; c) Workflow de aprovação; d) Documentos anexos.

Na etapa de Engenharia, são avaliados os requisitos mínimos para execução da sondagem, como tipo de sondagem e ensaios *in situ*, coleta de amostras, instrumentação e análise dos dados históricos da área de interesse. Após passar por todas as etapas, a equipe de banco de dados programa a atividade, gerando uma chave-primária única para cada furo, iniciando o fluxo de rastreabilidade.

A chave primária é uma nomenclatura única e padronizada gerada automaticamente no sistema GDMS IG (*Fusion*), demonstrado na Figura 2, através de um algoritmo que busca em toda a base de dados da empresa. A nomenclatura padrão da chave primária é representada pelo código da estrutura geotécnica, tipo de sondagem e sequencial numérico de 5 dígitos.

Primary Key		Drilling Type		Coordinate System			Customer data			
Nome_GDMS	Nome_Orig	Tipo_Furo	Loca	Sigla	Leste_Pri	Norte_Pro	Datum_Proj	Prof	Cliente	Especificacao_Tecnica
1091KS-PO00001	PI-S1-01	PO	S11D	1091KS	573572,137	9290720,394	SIRGAS2000	1,5	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-PO00002	PI-S2-02	PO	S11D	1091KS	573983,598	9290884,145	SIRGAS2000	1,5	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00001	SM-S1-01	SM	S11D	1091KS	573565,967	9290724,444	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00002	SM-S1-02	SM	S11D	1091KS	573561,767	9290690,494	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00003	SM-S1-03	SM	S11D	1091KS	573557,327	9290665,004	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00004	SM-S2-01	SM	S11D	1091KS	573970,328	9290833,765	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00005	SM-S2-02	SM	S11D	1091KS	574018,168	9290825,465	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00006	SM-S2-03	SM	S11D	1091KS	574006,698	9290850,205	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00007	SM-S2-04	SM	S11D	1091KS	573986,668	9290891,585	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00008	SM-S2-05	SM	S11D	1091KS	573974,958	9290916,315	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00009	SM-S2-06	SM	S11D	1091KS	574069,048	9290886,965	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT- 1091KS-X-500001
1091KS-SM00010	SM-BC-01	SM	S11D	1091KS	573845,730	9291150,890	SIRGAS2000	40	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0
1091KS-SM00011	SM-BC-04	SM	S11D	1091KS	573814,210	9291115,100	SIRGAS2000	35	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0
1091KS-SM00012	SM-BC-11	SM	S11D	1091KS	573829,810	9291077,160	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0
1091KS-SM00013	SM-BC-200	SM	S11D	1091KS	573716,372	9291128,680	SIRGAS2000	30	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0
1091KS-SM00014	SM-BC-201	SM	S11D	1091KS	573705,337	9291146,286	SIRGAS2000	35	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0
1091KS-SM00015	SM-BC-202	SM	S11D	1091KS	573694,791	9291163,401	SIRGAS2000	40	Projetos Capital	-90 PT-1000KS-X-500001 Rev0

Figura 2 Programação de furos e criação da chave-primária.

O banco de dados oficial utilizado pela Vale S.A é o GDMS *Fusion* (*Geological Database Management System*) da *Datamine®*, que é um sistema de gerenciamento de dados geológicos projetado para combinar todos os dados geológicos, geotécnicos, geofísicos e outros (*DATAMINE*, 2024).

A Vale S.A possui três soluções de banco de dados GDMS: GDMS Ferrosos para os furos de sondagem geológicos; GDMS Investigações Geotécnicas para os furos de sondagem e ensaios *in situ* de projetos geotécnicos; e GDMS Sondagem para gestão e produção de equipamentos.

Além da importação de todos os dados nos bancos GDMS, são disponibilizados os relatórios finais de campanha aos clientes internos contendo a avaliação geológico-geotécnica da região com os perfis (logs) de perfuração e ensaio para continuidade dos projetos de engenharia. Importante salientar que todos os furos programados e executados são espacializados no GIS Mineral, solução *ArcGIS Esri*, para elaboração dos mapas e acompanhamentos operacionais (Figura 3).

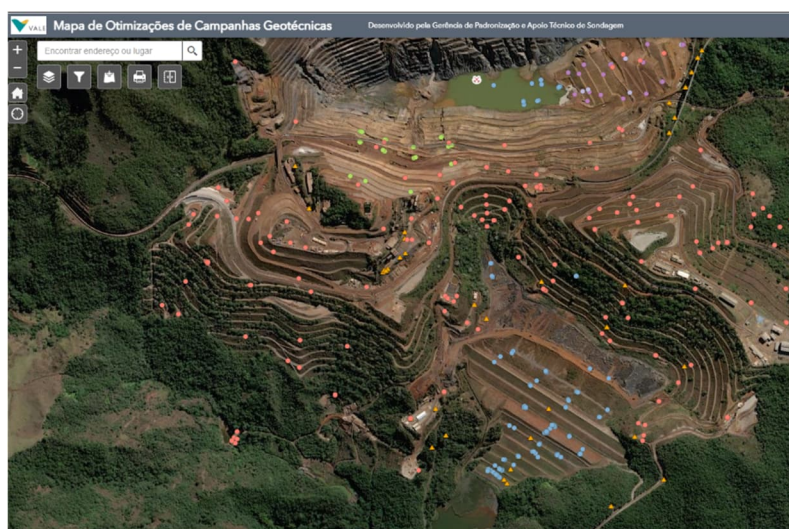


Figura 3 Espacialização de furos programados e executados no GIS Mineral.

2.2. Otimizações de Planos de Sondagem com Dados Históricos

Ao longo da captura dos dados, análises de engenharia são realizadas promovendo as otimizações de campanhas e espacialização de dados históricos e programados para aumentar a assertividade dos projetos. Uma vez que as campanhas são validadas pelas otimizações, os dados finais de sondagem passam pela equipe de governança que alimentam as informações no GDMS Investigações Geotécnicas e em mapas do GIS (Figura 3).

Como forma de apoiar o acesso aos dados técnicos armazenados no GDMS, foi desenvolvido um relatório de saída em *Power BI* que consome ambos os bancos com visualização geoespacializada e em perfil, conforme apresentado na Figura 4. Por meio de programação que utiliza bibliotecas em *Python*, além da conversão de coordenadas geográficas para espacialização dos furos armazenados no banco, o relatório prevê os gráficos (logs) a partir dos resultados já inseridos no banco de dados.

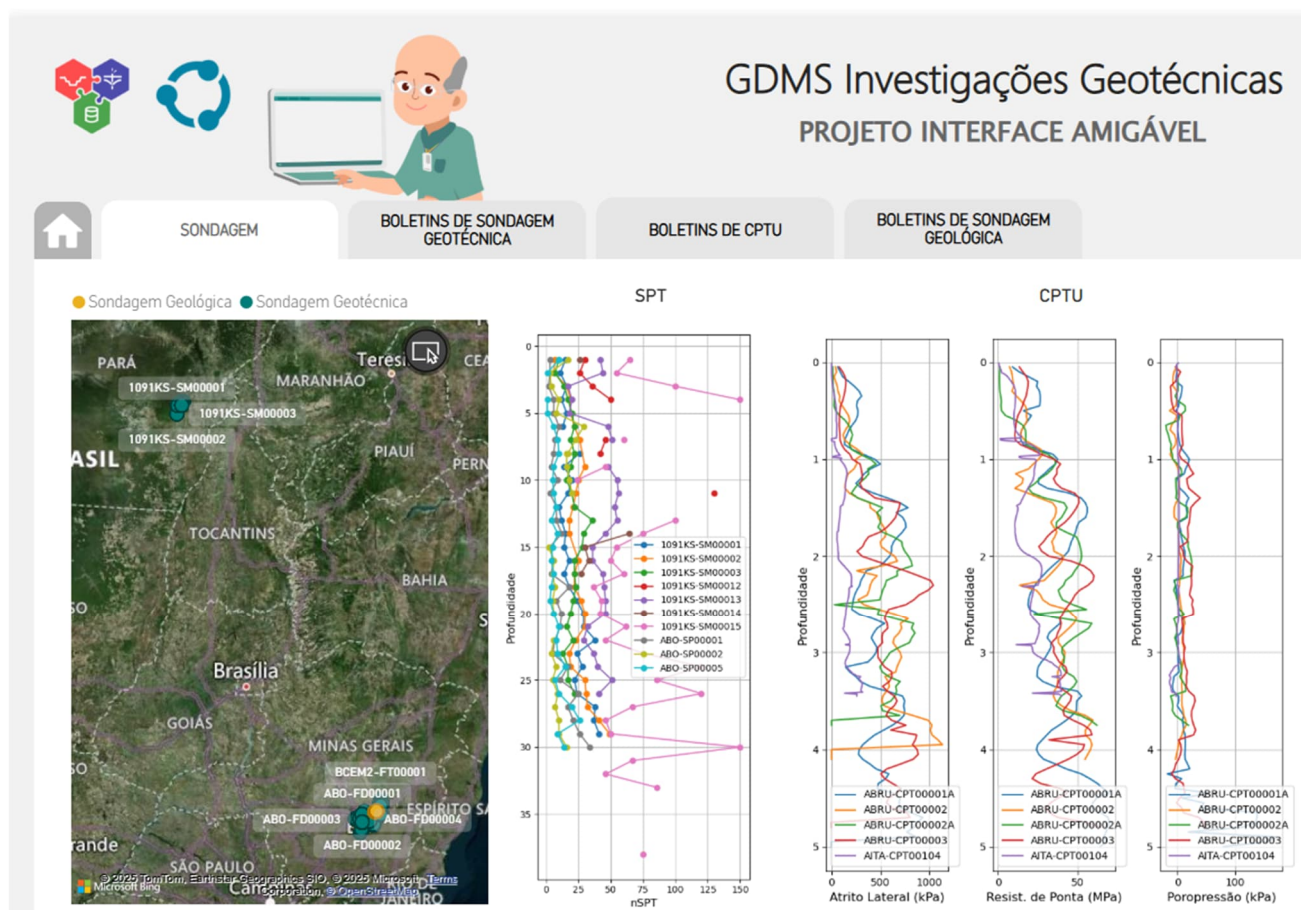


Figura 4 Apresentação de dados geotécnicos armazenados no GDMS

Estaire e Schweckendiek (2024) apresentaram no 7th *International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization* a evolução do Eurocode no que diz respeito à utilização de dados históricos e assertividade dos projetos de geotecnia. Os autores, reforçam que os projetos geotécnicos possuem muitas incertezas características dos processos de formação geológica e espacialização das informações. Isso afeta diretamente os fatores de segurança oriundos dos parâmetros obtidos por meio das investigações geotécnicas, o que reforça a necessidade de se planejar sondagens mais assertivas e com objetivos claros para fornecimentos dos dados de projeto.

Costa e Oliveira (2021) observaram que técnicas de otimização para planos de sondagem podem reduzir custos e aumentar a assertividade dos projetos. Na Vale S.A. em 2024, o processo de otimizações por meio das ferramentas apresentadas (*Power Apps, Power B.I., Python, GIS e GDMS*) avaliou 6 estruturas de rejeitos (empilhamento drenado e barragens), onde inicialmente eram previstas aproximadamente 14km de sondagens e, após as otimizações, foram emitidos planos de sondagem com 9km de perfurações, equivalente a uma redução de 37% da demanda inicial (Tabela 1).

Tabela 1 Planos de Perfuração Otimizados em Estruturas de Rejeitos

Estrutura de Rejeitos	Plano Inicial de Perfuração (m)	Plano de Otimização de Perfuração (m)	Diferença (m)
Barragens	1.206	870	-336
Pilhas Secas	13.275	8.199	-5.076

As otimizações representam uma alavanca de melhoria contínua da companhia como uma mineradora mais sustentável, mais segura, redução de exposição ao risco das atividades de sondagem, com maior qualidade de dados e consequente reduções de custos.

3. CONCLUSÕES

A implementação de processos automatizados e o uso de ferramentas computacionais para otimizar as investigações geotécnicas em estruturas de rejeitos têm demonstrado resultados significativos na Vale S.A. A organização e integração dos dados geotécnicos, juntamente com a aplicação de tecnologias avançadas, permitiram uma redução substancial na necessidade de novas sondagens, promovendo a reutilização de dados históricos e aumentando a eficiência dos projetos. Além disso, a adoção de práticas de governança de dados garantiu a qualidade e a confiabilidade das informações, essenciais para a segurança das estruturas de rejeitos e a proteção ambiental. Com a continuidade das otimizações e a integração de inteligência artificial, espera-se que os processos de investigação geotécnica se tornem ainda mais precisos e eficazes, contribuindo para a sustentabilidade e segurança das operações de mineração.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à equipe da Diretoria de Geociências e Sondagem da Vale S.A. pelo apoio contínuo e pela dedicação na coleta e organização dos dados geotécnicos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 de setembro de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 10 de abril de 2024. (BRASIL, 2010a)

BRASIL. Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 de outubro de 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2020-2022/2020/Lei/L14066.htm. Acesso em: 10 de abril de 2024.

DATAMINE. Brochura Fusion. 2024. Disponível em: https://cdn-msaudata.pressidium.com/wp-content/uploads/2023/05/Fusion_Brochure_230510_PT.pdf. Acesso em: 9 de abril de 2024. (DATAMINE, 2024)

Etaire, J. e Schweckendiek, T. (2024). Tratamento de incertezas na caracterização de locais na segunda geração do Eurocode 7, Palestras Plenárias, 7ª Conferência Internacional sobre Caracterização Geotécnica e Geofísica de Locais (ISC'7).

Silva, R. M., & Santos, J. A. (2023). "Investigações Geotécnicas em Barragens de Rejeitos: Desafios e Inovações." *Journal of Geotechnical Engineering*, 45(3), 123-135. DOI: 10.1007/s10706-023-01987-4.

Costa, A. B., & Oliveira, E. R. (2021). "Técnicas de Otimização para Planos de Perfuração Geotécnica." *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(4), 567-578. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.05.009.