

# Utilização de Rejeitos Arenosos para a Construção de um Muro de Solo Reforçado

Danilo Garbini Amaral

Engenheiro Civil, HEAD5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, danilo.amaral@head5.com.br

Lucas Ghion Zorzan

Engenheiro Civil, HEAD5 Engenharia, Curitiba, Brasil, lucas.zorzan@head5.com.br

Marcelo Rossi Campos

Diretor, HEAD5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marcelo.rossi@head5.com.br

**RESUMO:** O aproveitamento de rejeitos de mineração apresenta-se como uma abordagem promissora para o setor mineral. A mineração é uma atividade de grande importância econômica, mas que gera uma quantidade significativa de rejeitos. Além disso, com a proibição do método de alteamento a montante pela Lei Federal Brasileira nº 12.334 e com a maior fiscalização relacionada ao método de disposição em barragens, houve um aumento significativo de projetos de descaracterização, envolvendo, em muitos casos, a retirada de um grande volume de rejeito dos reservatórios. Surge, então, uma necessidade por métodos alternativos de disposição, incluindo o aproveitamento de rejeitos para a construção de estruturas geotécnicas para benefício do próprio empreendimento. Neste contexto, este artigo busca explorar a utilização de rejeitos de mineração como material de enchimento de muros de solo reforçado como uma solução viável e sustentável para a disposição desses resíduos. O aproveitamento do rejeito de mineração não apenas evita a necessidade de criação de novos depósitos, mas também proporciona melhor aproveitamento a esses materiais, reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para a economia de recursos naturais. Dessa forma, serão apresentados os aspectos práticos e teóricos que nortearam o desenvolvimento e a implantação de um muro de solo reforçado de 10,0 m de altura, cuja função é suportar as fundações de um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD), que, por sua vez, serve de apoio para a descaracterização de uma barragem de mineração localizada em Minas Gerais, Brasil. Os resultados dos ensaios laboratoriais e o monitoramento da estrutura implantada mostraram que a utilização de rejeito arenoso como material de enchimento do muro em solo reforçado é uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeitos de Mineração, Solo Reforçado, Contenções, Descaracterização de Barragens

**ABSTRACT:** The utilization of mining tailings has emerged as a promising approach for the mining sector. Mining is an economically important activity, but it generates a significant amount of waste. Additionally, with the prohibition of the upstream dam construction method by Brazilian Federal Law No. 12,334 and increased scrutiny related to dam disposal methods, there has been a significant rise in decharacterization projects, which often involve removing a large volume of tailings from the reservoirs. As a result, there is a need for alternative disposal methods, including the utilization of tailings for the construction of geotechnical structures for the benefit of the mining operation itself. In this context, this article aims to explore the use of mining tailing as backfill material in reinforced soil walls as a viable and sustainable solution for the disposal of these residues. The utilization of mining waste not only avoids the need for creating new deposits but also provides a second useful life for these materials, reducing environmental impact and contributing to the conservation of natural resources. In this way, the practical and theoretical aspects that guided the development and implementation of a 10.0 m high reinforced soil wall will be presented. Its function is to support the foundations of a Long-Distance Belt Conveyor (LDBC), which in turn serves as support for the decharacterization of a tailing dam located in Minas Gerais, Brazil. The results of laboratory tests and monitoring of the implemented structure have shown that the use of sandy tailings as filling material for the reinforced soil wall is a viable alternative from both technical and environmental perspectives.

**KEYWORDS:** Mining Tailings, Reinforced Soil, Retaining Walls, Decommissioning

## 1 INTRODUÇÃO

O setor mineral brasileiro tem passado por mudanças significativas após o rompimento das Barragens de Fundão (Mariana/MG) em 2015 e Feijão (Brumadinho/MG) em 2019. Como consequência desses eventos, legislações federais e estaduais passaram por recentes e importantes mudanças, destacando-se a proibição da construção de barragens alteadas a montante e a exigência quanto à descaracterização de estruturas existentes deste tipo (Lei Federal Brasileira Nº 12.334 alterada pela Lei Federal Brasileira Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020).

Neste contexto de descaracterização das barragens alteadas pelo método de montante, que pode envolver a remoção parcial ou integral da estrutura/reservatório, a necessidade de métodos alternativos de disposição de rejeito vem se tornando cada vez mais presente, principalmente quando se consideram os volumes armazenados em tais estruturas que normalmente extrapolam dezenas de milhões de metros cúbicos.

No que tange ao reaproveitamento de rejeitos de mineração, diversos estudos têm sido conduzidos como forma de fornecer uma utilidade do material para a sociedade. De acordo com Pedrosa (2020), o rejeito de minério de ferro pode ser aproveitado na produção de blocos cerâmicos, base e sub-base de pavimentos, telhas, concreto etc.

Diante deste cenário, o presente artigo apresenta um estudo de caso de um muro de solo reforçado, em que foi utilizado rejeito arenoso de minério de ferro como material de enchimento, abordando sobre os aspectos práticos e teóricos que subsidiaram o desenvolvimento do projeto e a implantação da estrutura.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O estudo de caso apresentado neste artigo é referente ao projeto e implantação de uma contenção do tipo MSR (Muro em Solo Reforçado), localizado nas margens de um reservatório de uma barragem em descaracterização, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Tendo em vista a área a ser descaracterizada e a distância entre a retirada do rejeito e sua disposição provisória e final, foi realizada a implantação de um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) para transporte do material. Como as declividades longitudinais para este tipo de estrutura são pequenas e a topografia local é bastante acidentada, houve a necessidade da implantação de uma contenção em aterro em um ponto baixo da topografia, com o objetivo de garantir as cotas mínimas para a implantação das fundações do TCLD.

O MSR foi projetado considerando uma altura máxima de contenção de 10 m, face inclinada em 10V:1H e geogrelhas espaçadas verticalmente a cada 0,60 m. Devido a limitações geométricas e a proximidade com uma encosta natural íngreme, houve a necessidade de considerar geogrelhas de diferentes comprimentos e diferentes resistências. Nas primeiras camadas de aterro foram consideradas geogrelhas com 5 m de comprimento e resistência à tração característica de 110 kN; nas intermediárias, geogrelhas com 7 m de comprimento e resistência à tração característica de 80 kN; nas camadas finais, geogrelhas com 7 m de comprimento e resistência à tração característica de 55 kN. A Figura 1 apresenta a seção típica considerada.

A contenção possui aproximadamente 90,0 m de comprimento e ao longo de sua extensão foram implantadas bases de concreto para a fundação da estrutura do TCLD, que possui dimensões de até 10,30 m x 9,0 m. Para o modelo de estabilidade, foram consideradas as sobrecargas obtidas do dimensionamento estrutural, que variam de 80 até 200 kPa. Além da área das bases, foi considerada uma sobrecarga mínima de 20 kPa, em conformidade com a ABNT NBR 16.920-1 (2021) e ABNT NBR 11.682 (2009)

Além de análises de estabilidade, também foram realizadas análises de tensão-deformação, com o objetivo de avaliar os deslocamentos e deformações na estrutura, além de subsidiar na verificação de todos os requisitos mínimos de estabilidade indicados pela ABNT NBR 16.920-1 (2021).

Quanto à caracterização geológico-geotécnica do local, havia uma pequena camada superficial de colúvio que foi removida completamente pelo projeto de escavação da contenção. A fundação da estrutura se encontra em grande parte apoiada em um solo residual jovem de filito, com número de golpes  $N_{SPT}$  variando de 30 golpes até o impenetrável. A contenção está localizada em uma região de transição entre as formações geológicas Santo Antônio e Saramenha, onde há ocorrência de filitos de coloração variegada (cinza avermelhado, cinza rosado, acastanhado e grafitoso).

### 3 PROJETO

O projeto foi concebido a partir do dimensionamento do MSR considerando todos os requisitos exigidos pela ABNT NBR 16.920-1 (2021). Neste sentido, foram realizadas análises de estabilidade pelo método do equilíbrio-limite, análises numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF) e análises de estabilidade por equações teóricas. Assim, foram avaliadas as estabilidades externa (tensão admissível na fundação, deslizamento e tombamento), interna (ruptura estrutural do reforço e arrancamento do reforço), geral e conexão da geogrelha com o paramento.

Em relação aos parâmetros geomecânicos dos materiais, somente o solo residual de filito da fundação havia sido amostrado na ocasião do projeto, tendo seus parâmetros obtidos por ensaios triaxiais do tipo adensado e não drenado. Em relação ao rejeito arenoso utilizado como material de enchimento do muro, não se dispunham de ensaios no material, em que foi necessária a adoção de parâmetros mais conservadores na etapa de projeto. Posteriormente e durante a execução da contenção, foram coletadas amostras para a realização de ensaios de cisalhamento direto, compactadas com o mesmo grau de compactação que estavam sendo obtidos em campo. Os parâmetros dos materiais estão apresentados na Tabela 1 e os resultados obtidos na análise de estabilidade na Figura 1.

Tabela 1: Parâmetros geomecânicos dos materiais

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E_s$ (MPa)
Enchimento (Rejeito Arenoso) <sup>(1)</sup>	20	0	32	48
Fundação (Solo Residual de Filito)	21	7	37	67

<sup>(1)</sup> Ensaios realizados do tipo cisalhamento direto durante a implantação resultaram nos seguintes parâmetros médios:  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>;  $c' = 2$  kPa e  $\phi = 39^\circ$ , a partir de 8 ensaios de cisalhamento direto (amostra inundada)

<sup>(2)</sup> Ensaios realizados do tipo triaxial CIU (adensado isotropicamente e não drenado), a partir de duas amostras com 4 corpos de prova cada ensaio.

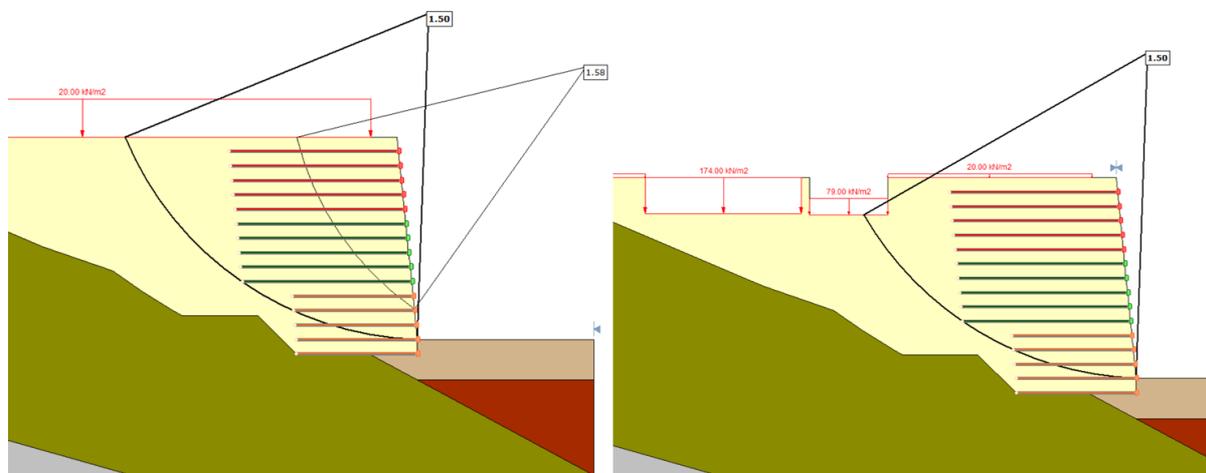


Figura 1: Análises de estabilidade: MSR sem as bases do TCLD (à esquerda) e MSR com as bases do TCLD (à direita)

Em relação às análises de tensão-deformação, foi realizada uma simulação do sequenciamento construtivo de obra, considerando estágios de *in situ* (condição inicial), escavação da fundação, alteamentos (a cada camada de 0,6 m) e sobrecargas finais. Tais análises permitiram a verificação de diversos elementos de dimensionamento, como tensões atuantes (Figura 2), deformações por cisalhamento e esforços internos na geogrelha (Figura 3) e deslocamentos na fundação ao longo da sequência executiva da estrutura (Figura 4).

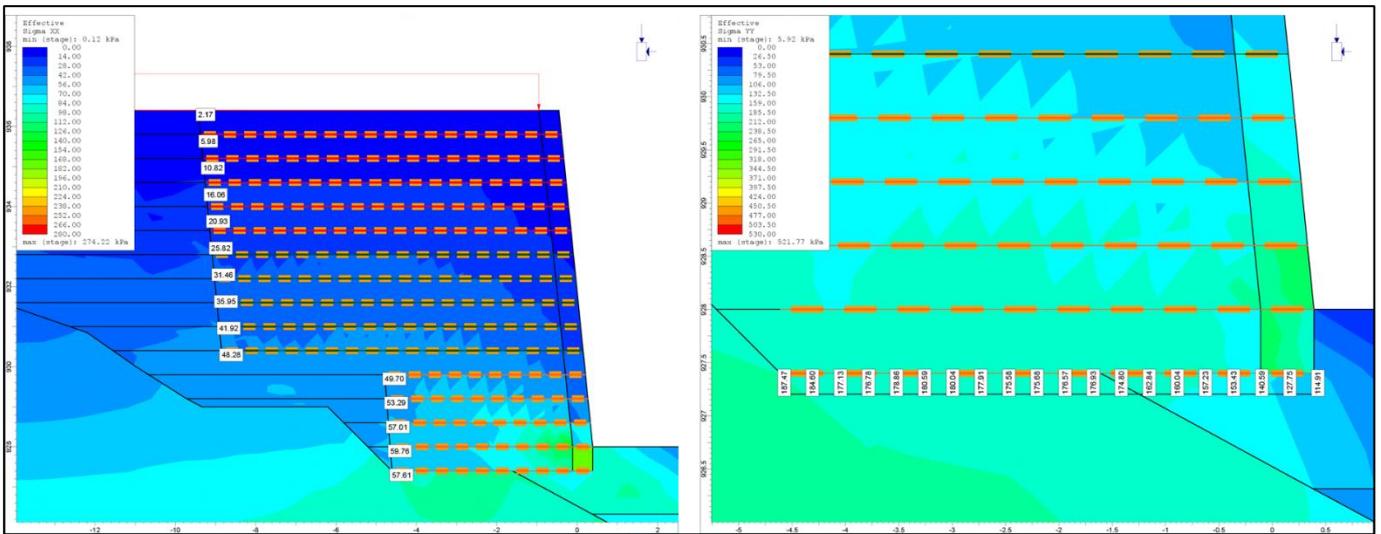


Figura 2: Análise de tensão-deformação: tensão horizontal no MSR (à esquerda) e tensões na base (à direita)

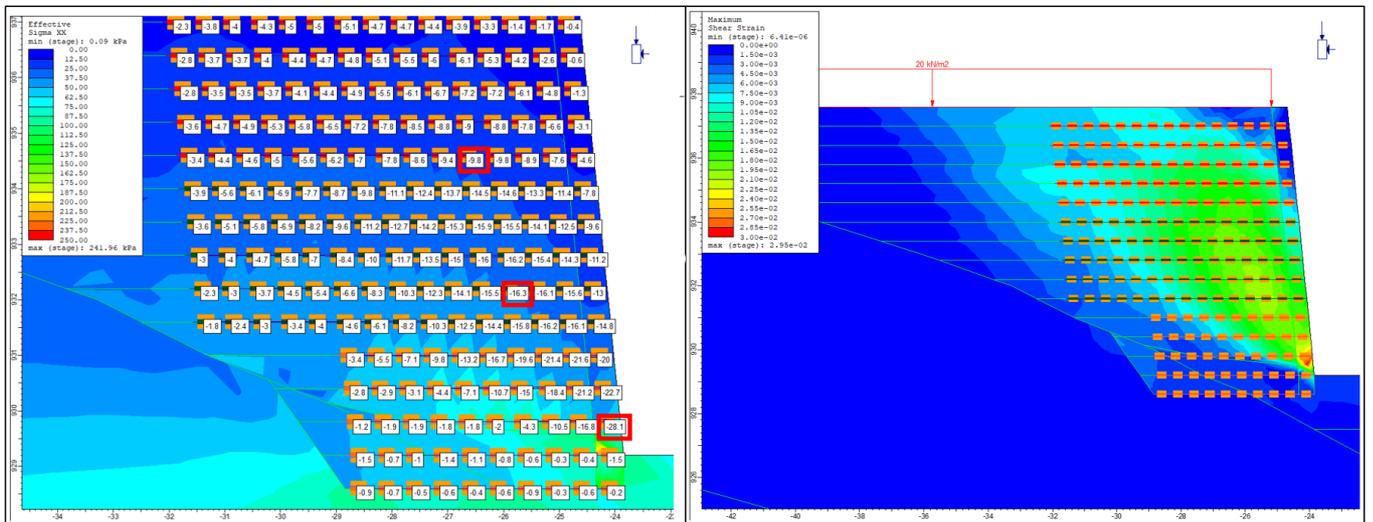


Figura 3: Análise de tensão-deformação: esforços internos nas geogrelhas (à esquerda) e deformações por cisalhamento (à direita)

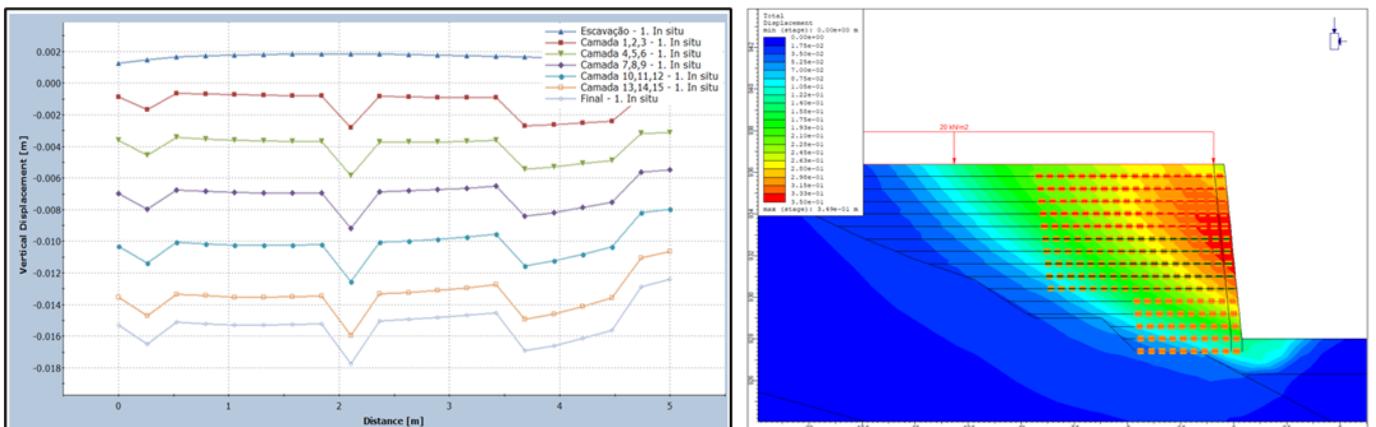


Figura 4: Análise de tensão-deformação: deslocamentos na fundação durante as obras (à esquerda) e deslocamentos totais no MSR (à direita)

A partir das análises numéricas e de equilíbrio-limite realizadas, foram calculados os fatores de segurança (FS), tendo sido obtidos valores acima dos mínimos admissíveis, conforme preconizado pela ABNT NBR 16.920-1 (2021), os quais estão resumidos na Tabela 2:

Tabela 2: Resumo dos fatores de segurança (FS) obtidos

Estabilidade	Mecanismo	FS obtido	FS <sub>min</sub>	Verificação
Externa	Tensão admissível na fundação	4,2	2,0	Ok
	Deslizamento	2,9	1,5	Ok
	Tombamento	6,1	2,0	Ok
Interna	Ruptura estrutural do reforço	2,2	1,5	Ok
	Arrancamento do reforço	1,5	1,5	Ok
Geral	-	1,5	1,5	Ok
Conexão com o paramento	-	2,2	1,5	Ok

#### 4 CONSTRUÇÃO

A primeira etapa da sequência construtiva foi a escavação da fundação para início do alteamento da contenção. Para o projeto de escavação, foi considerado um embutimento mínimo da fundação de 60 cm (equivalente a uma camada). Além disso, devido à proximidade da fundação com a encosta natural íngreme, foi proposto um faseamento das escavações em 7 fases, uma vez que houve a necessidade de taludes de corte provisórios com inclinação 1V:0,5H. Assim, à medida que a contenção era alteada, as fundações de cotas mais elevadas eram escavadas. A Figura 5 apresenta parte das escavações realizadas.

Após a escavação de cada fase, os alteamentos foram construídos. Em toda a fundação, foi colocada uma camada de areia de 20 cm de espessura, com o objetivo de alívio de subpressões por um eventual aumento do nível freático, que apesar de não ter sido identificado nas investigações realizadas, foi considerado. A face é constituída de uma tela metálica dobrada em “L” e preenchida por rachão em uma largura de aproximadamente 60 cm, intertravando os blocos com o objetivo de evitar movimentações durante a compactação. A Figura 6 apresenta o processo de execução dos elementos de face.

A compactação do rejeito arenoso foi realizada com dois tipos de veículo. Até 1,0 m a partir da face e com o objetivo de reduzir deslocamentos indesejáveis nos elementos, foi proposta a compactação com rolo vibratório pequeno controlado remotamente. Além desse 1,0 m, a compactação foi realizada com rolo liso vibratório convencional. A Figura 7 apresenta o processo de compactação no aterro do MSR.

Ao longo de cada alteamento da contenção, foram realizados levantamentos topográficos com o objetivo de avaliar os recalques e os deslocamentos na estrutura. Alguns ajustes de posicionamento dos elementos de face foram necessários, frente aos deslocamentos visíveis que estavam ocorrendo na estrutura, apesar de coerentes com os valores obtidos pela análise numérica.

Por fim, foi implantada a estrutura do TCLD sobre a contenção, conforme se apresenta na Figura 8. Em algumas bases do TCLD, houve interferência com as geogrelhas superiores do MSR e, neste caso, houve um recorte localizado para concretagem das fundações.



Figura 5: Escavação da fundação: escavação da primeira camada (à esquerda) e escavação de camadas acima dos alteamentos realizados (à direita)



Figura 6: Posicionamento do elemento de face: tela metálica em “L” (à esquerda) e preenchimento com rachão (à direita)



Figura 7: Compactação das camadas de rejeito arenoso: mini-rolô (vibratório) remoto (à esquerda) e rolo liso vibratório (à direita)



Figura 8: Contenção implantada com TCLD

## 5 CONCLUSÕES

O estudo de caso apresentado indicou a aplicabilidade com sucesso de rejeito arenoso de minério de ferro como material de enchimento de um muro de solo reforçado com geogrelhas. A reutilização do rejeito se mostrou adequada do ponto de vista técnico, cuja caracterização física e mecânica resultou em parâmetros adequados, refletindo em um monitoramento e observações em campo aderentes com os valores previstos pelos modelos numéricos. Além disso, a reutilização do material proporcionou economia ao empreendedor, uma vez que foi dispensada a exploração de novas jazidas para obtenção do material de aterro, impactando diretamente no custo final de implantação do MSR.

A estrutura foi dimensionada considerando todos os requisitos da ABNT NBR 16.920-1 (2021), tendo sido adotadas análises de equilíbrio-limite e análises numéricas de tensão-deformação. Os deslocamentos obtidos foram da ordem de 30 cm para uma altura máxima de 10 m. Todavia, a estrutura adotada é flexível em relação a deslocamentos dessa ordem (até 3% da altura), mas atenção especial deve ser dada a este parâmetro durante a construção da estrutura, com monitoramento adequado, seja por levantamento topográfico ou instrumentos específicos. Para a condição pós-construção, foi proposto o monitoramento da estrutura por meio de marcos superficiais instalados nas bases de concreto do TCLD.

A execução da estrutura revelou certas dificuldades em relação a este tipo de contenção, como deslocamentos/deformações excessivas que necessitaram de medidas corretivas durante a implantação e dificuldades em relação ao plano de instalação das geogrelhas. Devido a limitações topográficas e a existência de uma encosta íngreme próxima à estrutura, houve a necessidade de indicação de geogrelhas de diferentes resistências e diferentes comprimentos. Todavia, recomenda-se que sejam consideradas resistências e comprimentos padronizados com o objetivo de facilitar a montagem e implantação da estrutura.

## 6 REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 14.066 de 30 de setembro de 2020. (2020) - Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>. Acesso em: 11 jun. 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009) - NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021) - NBR 16920-2: 2021 - Muros e taludes em solos reforçados - Parte 1: Muros e taludes em solos reforçados. Rio de Janeiro.

PEDROSO, D. E. Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2020