RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE FATORES DE SEGURANÇA DAS PILHAS DA SIGMA

Em novembro de 2025, o empregador, Sigma Mineração, apresentou análise de estabilidade física para suas cinco pilhas de depósito de estéril e rejeito (PDER), em Itinga/MG. Os taludes das PDER 2, 4 e 5 apresentavam fatores de segurança (FS) entre bermas inferiores ao estabelecido na NBR 13029:2024, isto é, inferior a 1,3. A norma técnica da ABNT não isenta as empresas de manter o FS entre bermas inferior a 1,3 se o FS global é superior a 1,5, caso das PDER da Sigma Mineração.

As três pilhas foram interditadas em 05 de dezembro de 2025 por inúmeras irregularidades, sendo uma delas a ocorrência do FS entre bermas inferior a 1,3.

Já em dezembro de 2025, o empregador apresentou para cada uma das três PDER interditadas uma tabela de valores de tensão normal (σ) e tensão de cisalhamento (τ). Esses valores seriam informados para o material de enrocamento no software de cálculo de estabilidade, o Slide 2, utilizando-se a função "Shear/Normal Function", ao invés dos parâmetros ângulo de atrito e coesão utilizados na análise de estabilidade elaborada em novembro de 2025.

Enrocamentos são materiais que, quando submetidos a uma variação de tensões, sofrem transformações estruturais devidas a deslocamentos, rotação, e quebra de partículas. Para ter em conta estas variações e a sua influência nas características de deformação e resistência, é necessário estudar a distribuição das forças de contato e os fundamentos da quebra de partículas (Marsal, 1973, apud Cruz[3]).

Justificando o uso da função tensão normal (σ) x tensão de cisalhamento (τ), a Sigma citou os estudos geotécnicos de Leps[1] de 1970. Leps, diante do crescente número de barragens de enrocamento construídas, estudou a estabilidade física deste tipo de maciço, executando uma série de ensaios em equipamento triaxial de grande dimensão para rochas diversas. Barragem de enrocamento é um maciço construído de fragmentos rochosos compactados, sem coesão, cujo peso próprio e o imbricamento dos blocos

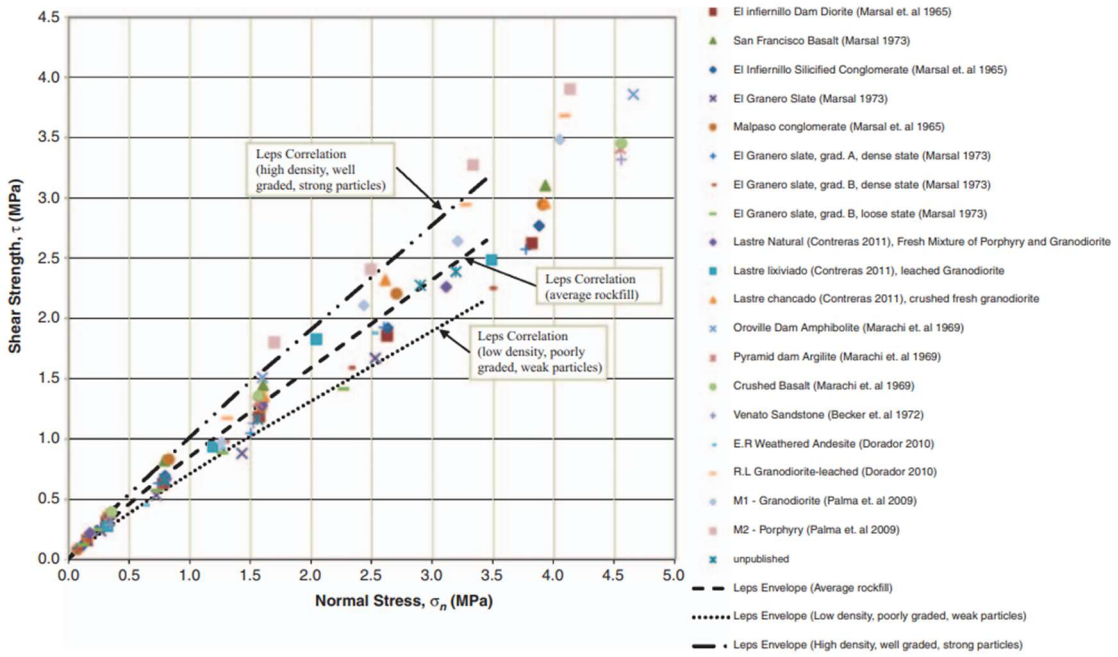
[1] LEPS, T. M. Review of Shearing Strength of Rockfill. Journal off The Soil Mechanics and Foundations Division, 1970.

fornecem estabilidade ao maciço, possuindo também um núcleo central em solo compactado ou material asfáltico.

Os materiais de enrocamento utilizados em barragens são extraídos de um depósito de rocha (pedreira). Da pedreira, os blocos de rocha maiores são britados, peneirados e depois enviados para a obra de acordo em as especificações do projetista. É fundamental que estes materiais sejam bem graduados, por exemplo, pedra de mão, brita 4, brita 3 etc.

Após seus estudos, Leps (apud Dorador[2] et al.) estabeleceu três envoltórias de resistência utilizando valores de tensão normal x tensão cisalhante, designadas como envoltória superior, intermediária e inferior.

Figura 1: Envoltórias de resistência de LEPS, tensão normal x tensão de cisalhamento, de materiais de enrocamento a partir de testes em triaxial de grande dimensão.



Fonte: Dorador[2], p. 97.

A envoltória superior se aplica para materiais de alta densidade, bem graduados e resistentes, e a inferior para materiais de baixa densidade, mal graduados e fracos. Na envoltória intermediária, temos materiais intermediários em termos de densidade, graduação e resistência.

Com base no trabalho de Leps e outros (De Mello, 1977; Charles e Watts, 1980; Maksimović, 1996; Douglas, 2002; Linero et al., 2006; De La Hoz, 2007), uma função de resistência ao cisalhamento não linear que depende

[2] DORADOR et al. Material characterisation. In Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Organizadores: MARK HAWLEY AND JOHN CUNNING. CSIRO Publishing, 2017.

da tensão normal foi desenvolvida para solos granulares grossos (incluindo estéril e materiais de estoque). Pesquisas em uma variedade de materiais de enrocamento mostram que as constantes “a” e “b” dependem não apenas dos parâmetros intrínsecos dos blocos (por exemplo, resistência, angularidade, granulometria), mas também de parâmetros de estado do material, como a densidade (Dorador et al., p. 96)[2].

A função é a seguinte: $\tau = a \times \sigma^b$, onde τ = tensão de cisalhamento (shear strength), σ = tensão normal (normal strenght), “a” e “b” são constantes.

A Tabela 01 apresenta um resumo das funções de resistência ao cisalhamento não linear sugeridas para enrocamento de alta e média qualidade, com base nos ensaios triaxiais relatados por Leps[1].

Tabela 01: Sugestões de funções de tensão de cisalhamento para enrocamento para material de enrocamento de moderada e alta qualidade.

Waste dump Construction method	Shear strength function (τ and σ in kPa)	Leps (1970) envelope (incorporating recent data) (Figs. 5.9 and 5.10)	Waste dump instability hazard
Top down spoil construction	$\tau = 1.446\sigma^{0.898}$	Lower bound	Very high to high (WHC IV and V)*
Top down spoil construction	$\tau = 1.576\sigma^{0.899}$	Lower quartile, between low and average rockfill (typical to model top down construction greater than 75 m high)	Moderate to low (WHC I to III)*
Bottom up spoil construction	$\tau = 1.899\sigma^{0.898}$	Upper quartile, between average and high rockfill (typical to model bottom up construction)	Very high to high (WHC IV and V)*
Bottom up spoil construction	$\tau = 2.067\sigma^{0.899}$	Upper bound	Moderate to low (WHC I to III)*

Fonte: Dorador et al., p. 97[2].

O que se verifica é a alteração do parâmetro “a”, tendo em vista que o parâmetro “b” foi estabelecido como 0,898.

Cruz[3] (1996, p. 241) vai além, pois cita que:

“Em análise de estabilidade, é conveniente usar envoltórias do tipo $\tau = a \times \sigma^b$ e mesmo $\tau = c \times a\sigma^b$, por que expressam de uma maneira mais correta a variação da resistência com a tensão normal aplicada”.

Fazendo uso dos valores de tensão normal (σ) e tensão de cisalhamento (τ) informados pela Sigma em sua análise de dezembro de 2025 e das quatro equações apresentadas na tabela 01, verificamos que a tensão cisalhante calculada está sempre inferior à tensão cisalhante informada pela empresa, conforme tabela 02.

[3] CRUZ, P. T. da. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

Também fazendo uso dos valores informados pela Sigma de tensão normal e tensão de cisalhamento e traçando as envoltórias de resistência para as três pilhas interditadas, verificamos que a envoltória com dados informados pela empresa está sempre acima da envoltória superior de Leps[1], conforme figuras 02, 03 e 04.

Tabela 02: Comparativo do cálculo da resistência ao cisalhamento para as pilhas 2, 4 e 5 da SIGMA, de acordo com as equações $\tau = 1{,}446 \times \sigma^{0{,}898}$, $\tau = 1{,}576 \times \sigma^{0{,}898}$, $\tau = 1{,}889 \times \sigma^{0{,}898}$ e $\tau = 2{,}067 \times \sigma^{0{,}898}$ e os valores informados pela empresa.

Pilha	a	σ (KPa)	$\tau_{calculado}$ (KPa)	$\tau_{informado\ Sigma}$ (KPa)
2	1,446	112	100,08	147,9
2	1,576	112	109,08	147,9
2	1,899	112	131,44	147,9
2	2,067	112	143,07	147,9
2	1,446	224	186,51	274,4
2	1,576	224	203,27	274,4
2	1,899	224	244,93	274,4
2	2,067	224	266,60	274,4
2	1,446	336	268,42	393,8
2	1,576	336	292,56	393,8
2	1,899	336	352,52	393,8
2	2,067	336	383,70	393,8
4	1,446	208	174,50	256,7
4	1,576	208	190,19	256,7
4	1,899	208	229,16	256,7
4	2,067	208	249,44	256,7
4	1,446	416	325,17	476,5
4	1,576	416	354,41	476,5
4	1,899	416	427,04	476,5
4	2,067	416	464,82	476,5
4	1,446	624	468,00	684,5
4	1,576	624	510,07	684,5
4	1,899	624	614,61	684,5
4	2,067	624	668,98	684,5
5	1,446	84	77,30	114,5
5	1,576	84	84,25	114,5
5	1,899	84	101,51	114,5
5	2,067	84	110,50	114,5
5	1,446	168	144,04	212,2
5	1,576	168	156,99	212,2
5	1,899	168	189,17	212,2
5	2,067	168	205,91	212,2
5	1,446	252	207,31	304,7
5	1,576	252	225,95	304,7
5	1,899	252	272,26	304,7
5	2,067	252	296,35	304,7

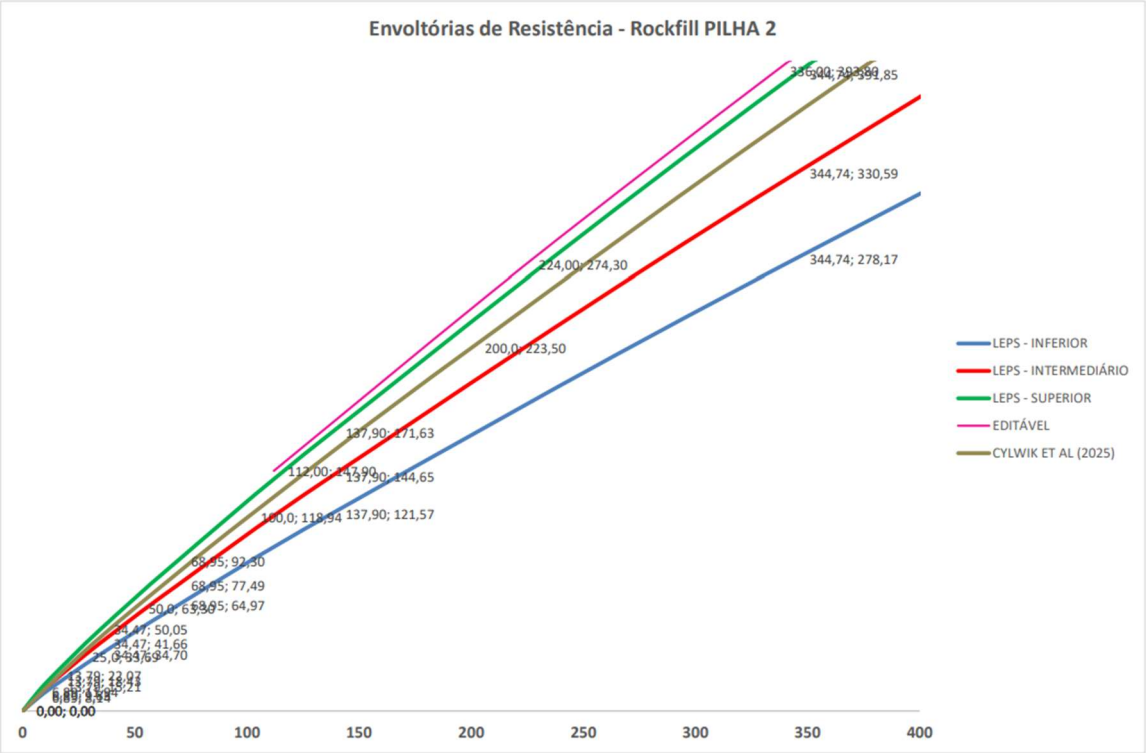
Fonte: Elaborado pela Auditoria-Fiscal do Trabalho.

Em 2025, Cylwik et al.[4] apresentaram um estudo com 900 ensaios em triaxial de grande dimensão com material de enrocamento. A intenção era calibrar e refinar as envoltórias de Leps[1]. Ao final, eles apresentaram uma equação para traçar a envoltória de resistência, qual seja:

$$\tau = \tan \emptyset'_1(10pa)\ 0.1 \times \sigma^{0.9}$$

Fazendo uso do parâmetro $\emptyset'_1$ igual a 44º, para um enrocamento bem graduado, resistente e de alta densidade, para os valores de tensão normal iguais a 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 e 4000 KPa, obteve-se a envoltória de resistência situada entre a envoltória superior e a intermediária de Leps, conforme apontado nas figuras 02, 03 e 04. Pode ser verificado que a envoltória com os dados fornecidos pela SIGMA está muito acima da envoltória de Cylwik et al[4].

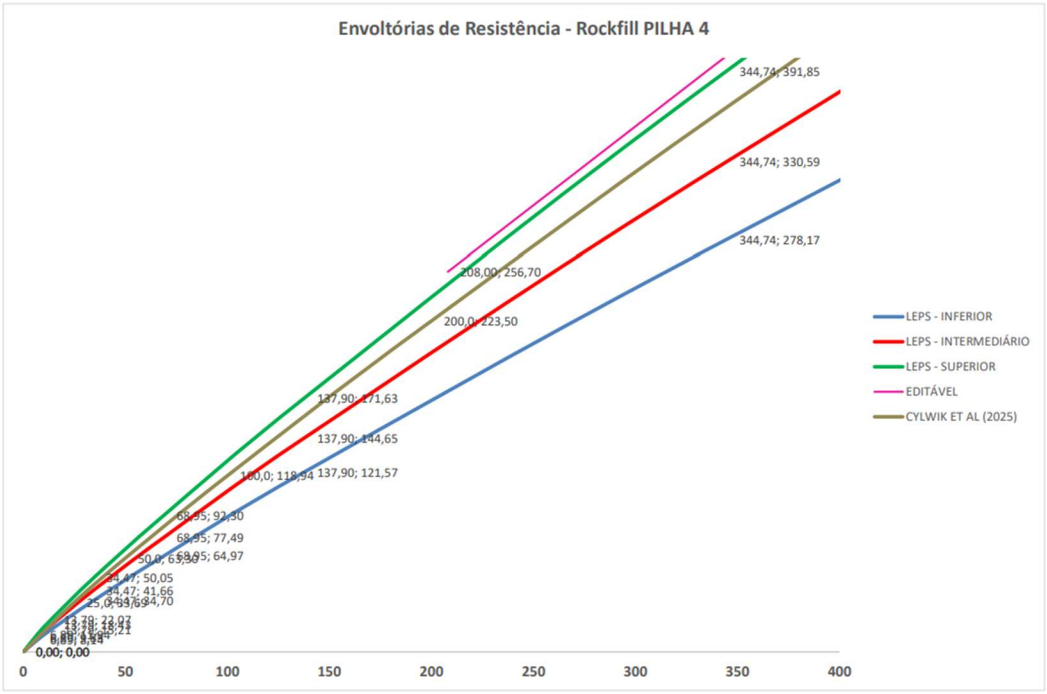
Figura 02: Envoltórias de Leps, envoltória de Cylwik e envoltória com dados (tensão normal x tensão de cisalhamento) informados pela SIGMA para a pilha de estéril/rejeitos 2.



Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

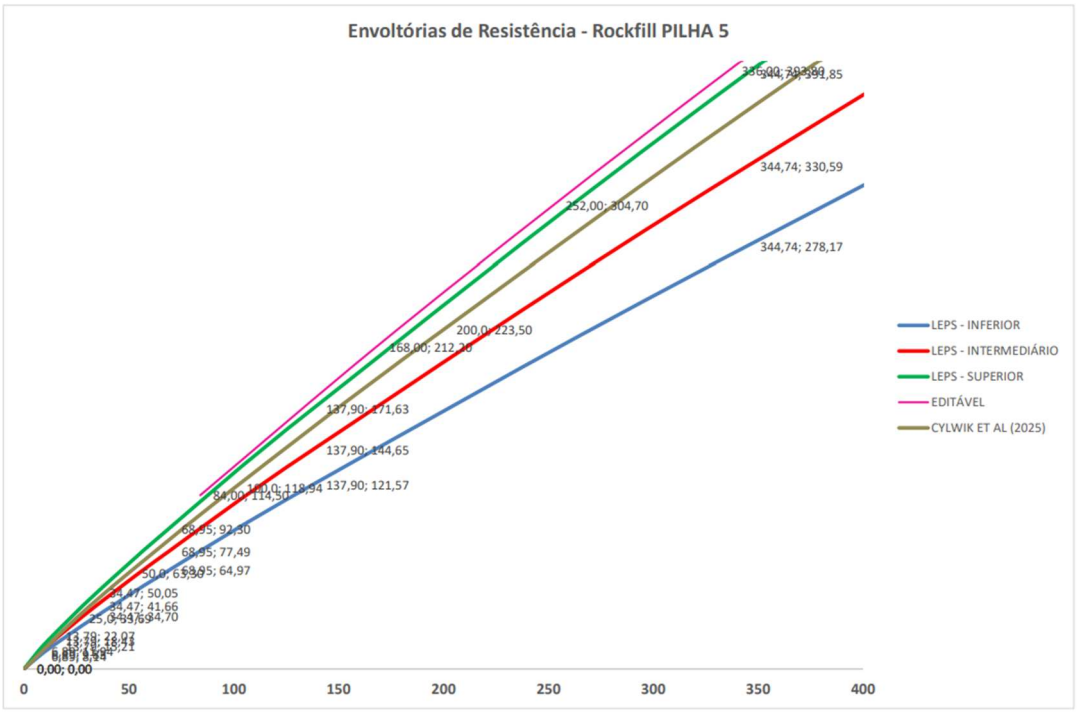
[4] CYLWIK S.C. et al. Update to the Leps Strength Envelopes for Rockfill Based on 900 Large-Scale Triaxial Tests. International Journal of Geomechanics, ASCE, ISSN 1532-3641. 2025.

Figura 03: Envoltórias de Leps, envoltória de Cylwik e envoltória com dados (tensão normal x tensão de cisalhamento) informados pela SIGMA para a pilha de estéril/rejeitos 4.



Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

Figura 04: Envoltórias de Leps, envoltória de Cylwik e envoltória com dados (tensão normal x tensão de cisalhamento) informados pela SIGMA para a pilha de estéril/rejeitos 5.



Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

Na análise de dezembro de 2025, a SIGMA não explicou de qual lugar extraiu os valores de tensão normal e de tensão de cisalhamento apresentados, nem sequer detalhou a metodologia de cálculo adotada.

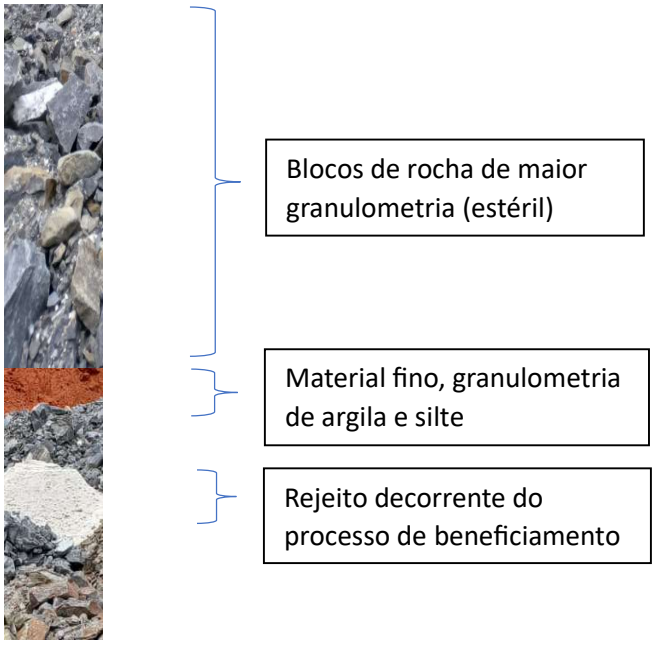
Explicou posteriormente a SIGMA, em documento complementar à análise de estabilidade de dezembro de 2025 enviado à fiscalização trabalhista e durante reunião que ocorreu em 19/01/2026 com representantes da empresa e da fiscalização trabalhista na SRT-MG, que:

“4.2 Estimativa da Tensão Normal Efetiva

A tensão normal efetiva (σ'_n) foi estimada a partir da altura total de cada pilha, considerando um estado de tensões predominantemente gravitacional, conforme a expressão: $\sigma'_n = \gamma \times H$, onde γ é o peso específico efetivo do estéril e H é a altura total da pilha. A definição da faixa de tensões normais adotadas foi realizada individualmente para cada pilha”.

O que a Sigma propôs não faz sentido, pois a coluna de material existente na pilha não é composta de um maciço integral de rocha, mas sim de blocos de rocha sobrepostos onde existem inúmeros vazios, além de material fino, com granulometria de argila e silte (material marrom), e de rejeitos advindos do processo de beneficiamento (material branco), conforme representa a figura 06.

Figura 06: Representação dos vários materiais depositados nas pilhas de depósito de estéril/rejeitos da Sigma.



Fonte: Elaborada pela Auditoria-Fiscal do Trabalho.

Dorador et al.[2] informaram que a compreensão da qualidade e da variabilidade dos materiais de enrocamento é importante ao avaliar sua resistência ao cisalhamento, comportamento de deformação e propriedades hidrogeológicas. O contexto geológico e a origem da rocha residual podem fornecer informações sobre as características físicas do material. Os principais atributos que podem afetar a qualidade dos materiais de enrocamento incluem granulometria, resistência, durabilidade e estabilidade química. Muitos desses fatores estão inter-relacionados e são influenciados pela forma como o material é detonado, escavado, transportado e depositado no aterro ou pilha de material.

Também trazem os autores acima citados[2] que a qualidade do material de enrocamento pode ser caracterizada qualitativamente com base na resistência, durabilidade e distribuição granulométrica das partículas da seguinte forma:

- baixa qualidade – rochas fracas com baixa durabilidade e teor de finos (% que passam na peneira nº 200) acima de 25%;
- qualidade moderada – rochas com resistência e durabilidade intermediárias, com 10 a 25% de finos;
- alta qualidade – rochas fortes e duráveis com menos de 10% de finos.

A Sigma não levou em consideração na sua análise de estabilidade a resistência e a durabilidade dos blocos de rocha e a porcentagem de finos do material que é lançado em suas PDER.

Com as imagens produzidas pela fiscalização do trabalho em 12/11/2025 (figuras 07 a 11), podemos ver que montes de blocos de rocha e de material fino (granulometria de argilas e siltes) derivados das duas cavas de produção e de rejeito de beneficiamento foram lançados lado a lado sobre a pilha através de caminhões.

Conforme informado pelos representantes da Sigma Mineração, um trator espalha o material com sua lâmina. Nesse momento, não é possível garantir que houve separação adequada dos três tipos de material que foram depositados lado a lado. Após o espalhamento, não é possível que caminhões transitem sobre o material já lançado para descarregar mais blocos de rocha, pois as arestas deles cortariam os pneus dos caminhões, conforme informação dos representantes da Sigma. Faz-se então uma forração com o rejeito advindo do processo de beneficiamento do mineral

Espodumênio. Esse rejeito é espalhado com uso de pá-carregadeira, não existindo uma compactação com rolo compactador. Antes que essa camada de rejeito se consolide como uma pista para rodagem dos caminhões, parte desse material cai entre os vazios dos blocos de rocha superiores.

Figura 07: Materiais depositados sobre pilha para serem espalhados pelo trator. Podem ser vistos montes de material fino (cor marrom) ao lado de montes de blocos de rocha.

Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho, 12/11/2025.

Figura 08: Materiais depositados sobre pilha para serem espalhados por trator. Podem ser vistos montes de rejeito de beneficiamento (cor branca) ao lado de montes de blocos de rocha.

Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho, 12/11/2025.

Figura 09: Materiais depositados sobre pilha para serem espalhados pelo trator. Podem ser vistos montes de material fino (cor marrom) ao lado de montes de blocos de rocha e de montes de rejeito de beneficiamento (cor branca).

Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho, 12/11/2025.

Figura 10: Camada de rejeito de beneficiamento do mineral Espodumênio que serve como pista de rodagem para caminhões lançarem mais blocos de rocha.

Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho, 12/11/2025.

Figura 11: Camada de rejeito de beneficiamento de Espodumênio (cor branca) lançada sobre talude da pilha.

Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho, 12/11/2025.

Wilson[5] cita diferentes formas de co-disposição de rejeitos e de estéril existentes com base no grau de mistura dos dois materiais. Pode ocorrer com a adição de rejeitos a um depósito de estéril, com a adição de estéril aos rejeitos, mistura em camadas de estéril e rejeitos, co-disposição por bombeamento e, finalmente, rocha pastosa, um material gerado pela mistura de estéril e rejeitos.

Um exemplo disso é a deposição de rejeitos em rocha estéril, conforme descrito por Wilson[5] (figura 12). Aplicações bem-sucedidas exigem que os rejeitos não sejam segregantes (espessados), mas ao mesmo tempo suficientemente fluidos para permitir o fluxo para os espaços vazios dentro da rocha estéril.

Figura 12: Rejeitos espessados lançados em depósito de estéril.

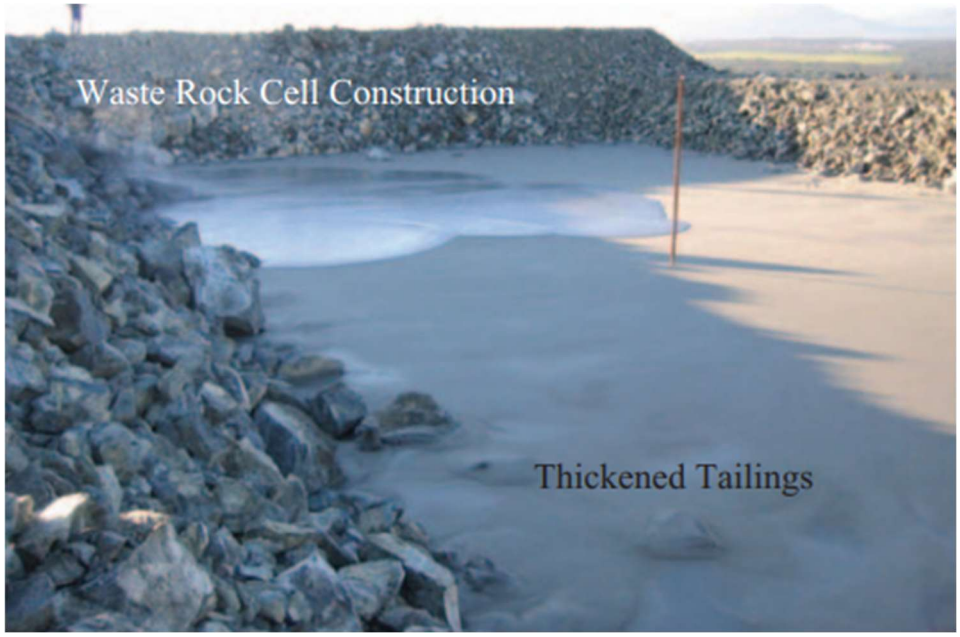
Fonte: Wilson[5], p. 273.

Um segundo exemplo é a mistura em camadas de rejeitos com rocha estéril. É semelhante à deposição de rejeitos espessados em rocha estéril, exceto que, neste caso, a consistência dos rejeitos espessados não permite o fluxo e a entrada dos rejeitos na matriz do perfil de rocha estéril. Lamontagne et al. (2000, apud Wilson[5], p. 274) descreveram a construção de um perfil de depósito de rejeitos com camadas horizontais de rejeitos espessados, de 1 a 2 m de espessura, entre camadas sequenciais verticais de rocha estéril. A figura 13 ilustra um exemplo de uma camada espessada de rejeitos

[5] WILSON W. Emerging Technologies. In Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Organiz.: Mark Hawley and John Cunning. CSIRO Publishing, 2017.

minerários com cerca de 1 m de espessura sobreposta a uma camada de rocha estéril.

Figura 13: Mistura de camada de rejeitos minerários e rochas estéreis.



Fonte: Wilson[5], p. 273.

Verifica-se então que existem algumas possibilidades para lançamento conjunto de rejeitos minerários e de material estéril. Contudo, deve haver um plano de lançamento bem definido dos materiais, uma correta caracterização deles, assim como garantir a estabilidade física dessa pilha.

Além de ter citado Leps[1] na análise de estabilidade das pilhas elaborada em dezembro de 2025, a Sigma também citou Barton[6].

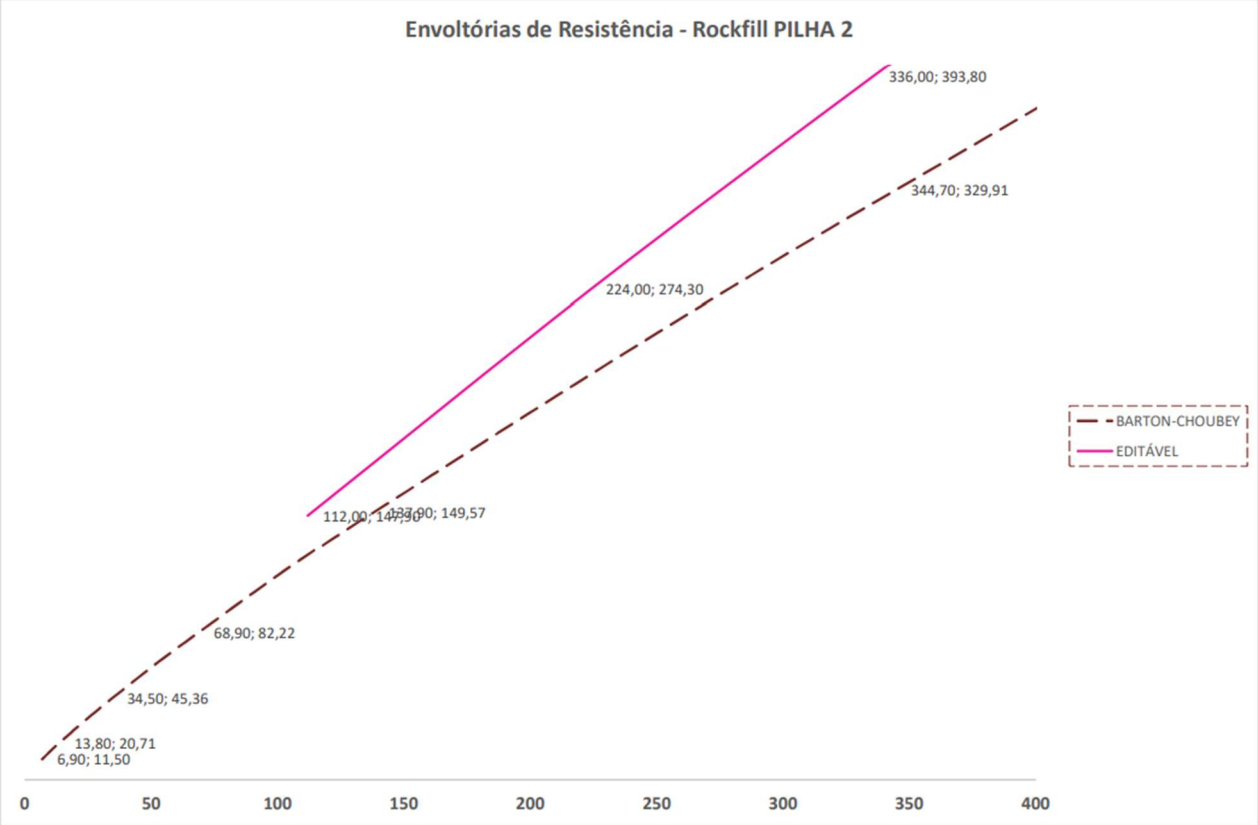
Em artigo publicado em 2008, Barton e colegas descreveram seus estudos de estabilidade com material de enrocamento, não utilizando ensaios de amostras em equipamento triaxial de grande escala, mas fazendo uso do "tilt test". Era necessário determinar a resistência (S), a rugosidade (R) e o ângulo de atrito residual (ϕ_r) do material de enrocamento. Com esses três valores calcula-se a tensão de cisalhamento do material de enrocamento utilizando a seguinte equação:

[6] BARTON, N. R. Shear Strength of Rockfill, Interfaces and Rock Joints, and their Points of Contact in Rock. Dump Design. Rock Dumps 2008 - A. Fourie (ed)2008 Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9804185-3-8.

$$\tau = \sigma_n \tan [R \times \log (S/\sigma_n) + \phi_r]$$

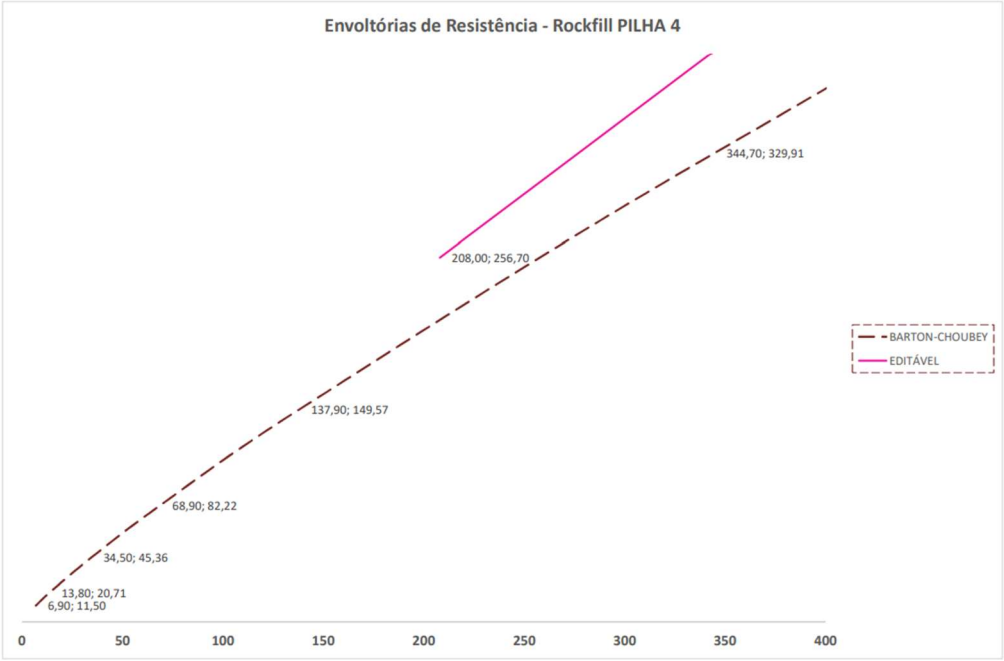
Apesar de citar a teoria de Barton e colegas em sua análise de estabilidade, a Sigma não utilizou qualquer um dos parâmetros utilizados por eles para calcular a tensão de cisalhamento do material estéril depositado em suas pilhas. Abaixo temos a envoltória de resistência de Barton utilizando o parâmetro R igual a 9, ϕ_r igual a 27º, S igual a 25 MPa e as tensões normais iguais a 6.90, 13.80, 34.50, 68.90, 137.90, 344.70, 689.50, 1379.00 e 3447.40 KPa. Pode-se verificar que a envoltória de Barton está bem abaixo das envoltórias de resistência com os dados informados pela Sigma para as pilhas 2, 4 e 5, conforme figuras 14 a 16.

Figura 14: Envoltória de resistência de Barton e envoltória de resistência com os dados informados pela SIGMA para a pilha 2.



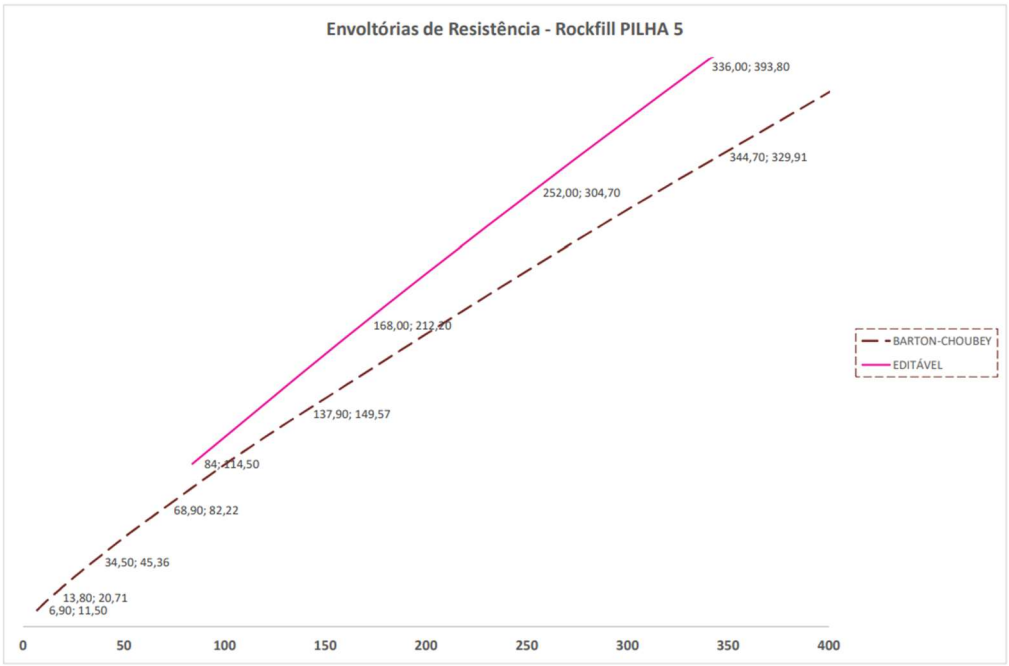
Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

Figura 15: Envoltória de resistência de Barton e envoltória de resistência com os dados informados pela SIGMA para a pilha 4.



Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

Figura 16: Envoltória de resistência de Barton e envoltória de resistência com os dados informados pela SIGMA para a pilha 5.



Fonte: Auditoria-Fiscal do Trabalho.
Obs.: A envoltória informada no gráfico como editável (cor rosa) representa os dados fornecidos pela SIGMA.

Na análise de estabilidade de dezembro de 2025, a SIGMA não explicou de qual lugar extraiu os valores de tensão de cisalhamento apresentados, nem sequer detalhou a metodologia de cálculo adotada.

Explicou posteriormente a SIGMA Mineração, em documento complementar à análise de estabilidade, que:

"4.3 Cálculo da Resistência ao Cisalhamento

Para cada valor de σ'_n, a resistência ao cisalhamento τ foi calculada a partir da envoltória não linear derivada dos modelos de Leps (1970) e Barton (2008), expressa conceitualmente por: $\tau = \sigma'_n \times \tan(\phi\text{mobilizado})$".

O que a Sigma Mineração propôs não faz sentido, pois a equação utilizada para o cálculo da resistência ao cisalhamento $\tau = \sigma'_n \times \tan(\phi\text{mobilizado})$ em nada se assemelha as equações utilizadas para traçar as envoltórias de resistência que caracterizam os estudos de Leps[1], Barton[6] e Cylwik[4], quais sejam:

- Leps: $\tau = a \times \sigma^b$, onde τ = tensão de cisalhamento (shear strength), σ = tensão normal (normal strenght), "a" e "b" são constantes.
- Barton: $\tau = \sigma_n \tan [R \times \log (S/\sigma_n) + \phi_r]$, onde τ = tensão de cisalhamento (shear strength), σ = tensão normal (normal strenght), S é a resistência, R é a rugosidade e (ϕ_r) é o ângulo de atrito residual do material de enrocamento.
- Cywilk: $\tau = \tan \emptyset'_1(10pa)\ 0.1 \times \sigma^{0.9}$.

O que a Sigma Mineração utilizou foi a clássica equação aplicada à mecânica dos solos, a equação de Coulomb, qual seja:

$$\tau = \sigma_n \times \tan \phi + c$$

Como a coesão (c) é nula para este tipo de material, obtém-se a equação inadequada utilizada pela empresa para caracterizar a resistência ao cisalhamento dos blocos de rochas que compõem as suas pilhas.

Em razão da inadequação das informações prestadas pela Sigma Mineração referente à tensão normal e à tensão de cisalhamento para as três pilhas interditadas, verifica-se que o fator de segurança de estabilidade física para as várias seções traçadas nas PDER 2, 4 e 5 dobrou no relatório de análise de estabilidade apresentado em dezembro de 2025 em relação ao relatório de novembro de 2025.

A envoltória de resistência com os dados de tensão normal e de tensão de cisalhamento trazidos pela empresa ficaram sempre acima das envoltórias de resistência que caracterizam os estudos de Leps[1], Barton[6] e Cylwik[4], conforme figuras 02, 03, 04, 14, 15 e 16.

Conforme já informado, as PDER 2, 4 e 5 não são compostas apenas de blocos de rocha como faz parecer a Sigma, que ela chamou em sua análise de "enrocamento", mas também de material fino (granulometria de argila e silte) e de rejeito derivado do processo de beneficiamento do Espodumênio. Em nenhum momento dos estudos elaborados por Leps, Barton e Cylwik, são feitas considerações sobre o lançamento de rejeitos derivados do processo de beneficiamento de minérios em conjunto com material estéril de rocha.

Como já citado, PDER são estruturas geotécnicas diferentes de barragens de enrocamento. Essas últimas são construídas como material selecionado, bem graduado (Ex.: pedra de mão, brita 4, 3 etc), e não advindos diretamente de uma cava e carregados em caminhão após a detonação da rocha. Além disso, em uma barragem existe compactação do enrocamento com rolos vibratórios compactadores, além da molhagem com o intuito de evitar recalques pós-construção.

As pilhas da Sigma, além de não terem material selecionado e bem graduado, ainda possuem camadas de rejeitos advindos do processo de beneficiamento, pois é necessária a formação de pista de rolamento para que os caminhões possam lançar mais blocos de rocha para o alteamento das estruturas.

Diante dessas considerações, verifica-se a inadequação do cálculo do fator de segurança de estabilidade física das PDER 2, 4 e 5 utilizando-se os valores de tensão normal e tensão cisalhamento informados pela Sigma na função "shear/normal" do software de cálculo Slide 2. Tal inadequação é expressa claramente quando apontado que o FS das pilhas na análise de estabilidade de dezembro de 2025 é o dobro daquele verificado na análise de novembro de 2025.

Além disso, a Sigma apresentou os mesmos parâmetros geotécnicos para a fundação das suas três pilhas na análise de estabilidade de dezembro de 2025, conforme figuras 17, 18 e 19 (figuras 10, 21 e 32 no relatório da

Sigma), isto é, peso específico (ɣ) de 21 KN/m³, coesão de 50 KPa, ângulo de atrito (ϕ) igual a 34º.

Figura 17: Cálculo de estabilidade da seção 2 da PDER 2 pela Sigma.

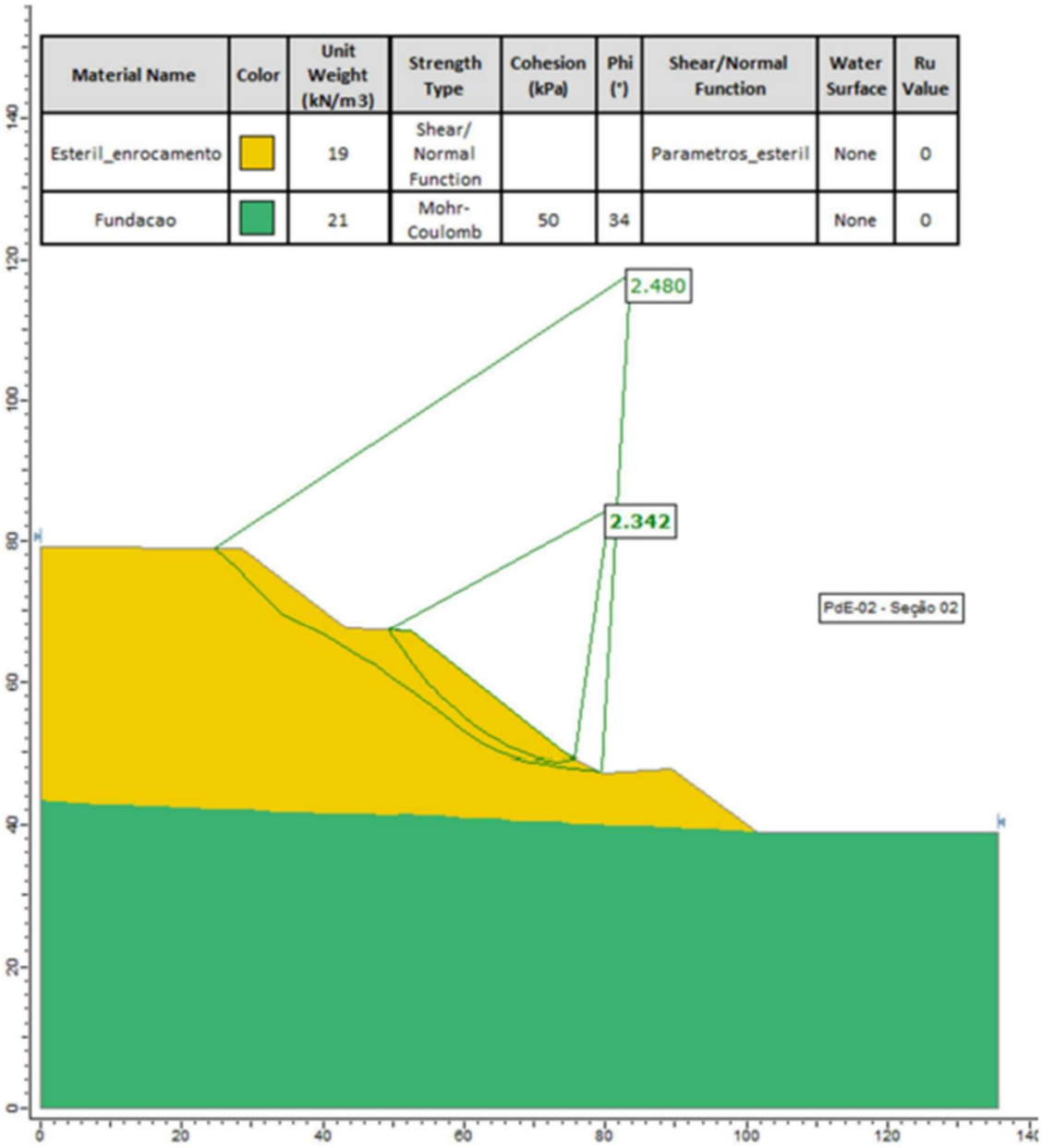


Figura 10 – Seção 2 PDER-02.

Fonte: Sigma. Relatório de análise de estabilidade das pilhas de dezembro de 2025.

Figura 18: Cálculo de estabilidade da seção 1 da PDER 4 pela Sigma.

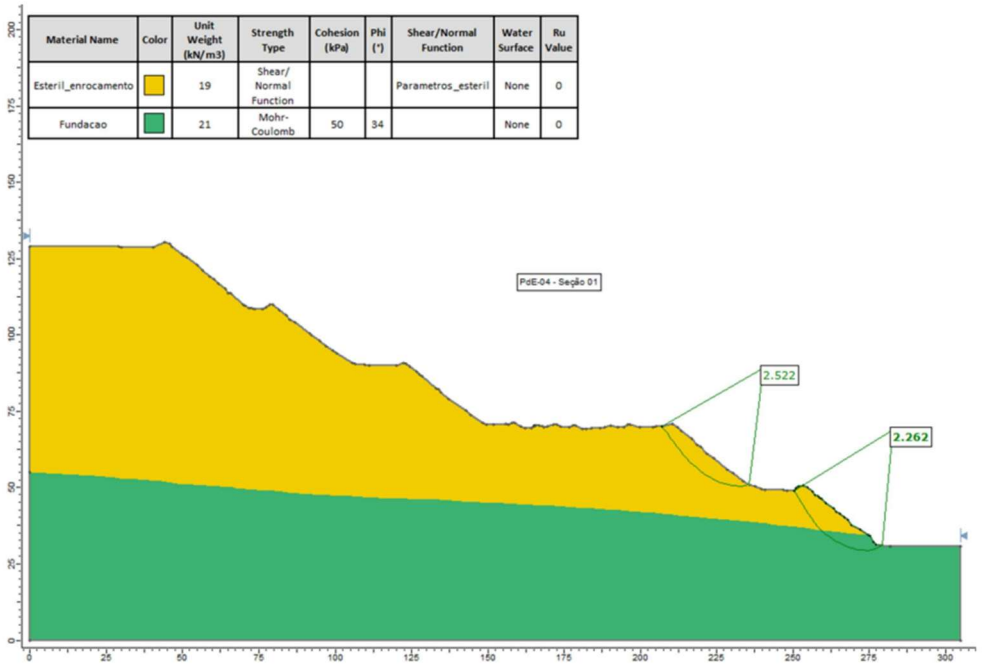


Figura 21 – Seção 1 PDER-04.

Fonte: Sigma. Relatório de análise de estabilidade das pilhas de dezembro de 2025.

Figura 19: Cálculo de estabilidade da seção 3 da PDER 5 pela Sigma.

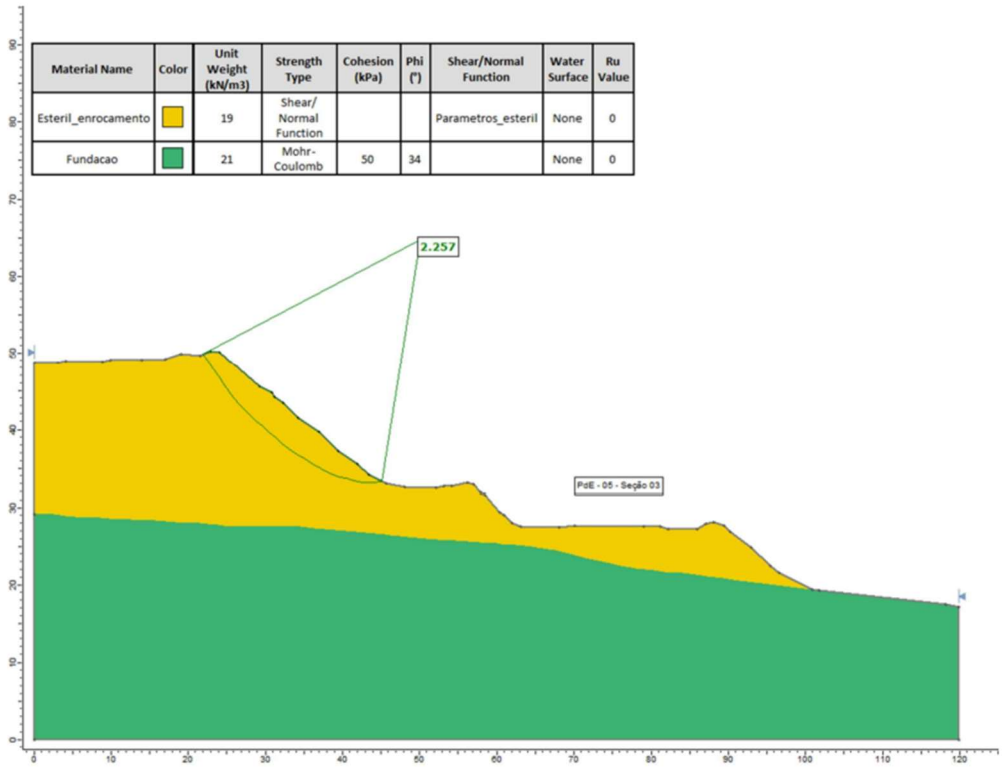


Figura 32 – Seção 3 PDER-05.

Fonte: Sigma. Relatório de análise de estabilidade das pilhas de dezembro de 2025.

Notificado em 19/01/2026 para apresentar um detalhamento melhor das fundações de suas pilhas, a Sigma apresentou em 02/02/2026, em meio físico, documento intitulado “Detalhamento das fundações das pilhas no laudo de análise, com os seguintes parâmetros geotécnicos para as fundações das três pilhas:

Tabela 03: Parâmetros geotécnicos para as fundações da PDER 02.

Materiais	ɣ (KN/m³)	C’ (KPa)	ϕ (graus)
Fundação argila	18	10	25
Fundação saprolito	16,4	7,1	28,5
Fundação xisto	21	50	34

Fonte: Extraído de Sigma. Detalhamento das fundações das pilhas no laudo de análise, 27/01/2026.

Tabela 04: Parâmetros geotécnicos para as fundações da PDER 04.

Materiais	ɣ (KN/m³)	C’ (KPa)	ϕ (graus)
Fundação argila	18	10	25
Fundação saprolito	17,7	3,4	32
Fundação xisto	21	50	34

Fonte: Extraído de Sigma. Detalhamento das fundações das pilhas no laudo de análise, 27/01/2026.

Tabela 05: Parâmetros geotécnicos para as fundações da PDER 05.

Materiais	ɣ (KN/m³)	C’ (KPa)	ϕ (graus)
Fundação argila	18	10	25
Fundação saprolito	17,7	3,4	32
Fundação xisto	21	50	34

Fonte: Extraído de Sigma. Detalhamento das fundações das pilhas no laudo de análise, 27/01/2026.

Conforme se verifica para as três pilhas, os parâmetros para a “fundação argila” são iguais e foram estimados de acordo com os seguintes dizeres:

“Com base em correlações empíricas entre NSPT e ângulo de atrito para solos argilo-siltosos residuais, bem como recomendações de Duncan, Wright e Brandon (2014), valores típicos de ϕ’ situam-se entre 24º e 28º para materiais com as características observadas.

Considerando: - a presença significativa de fração argilosa e siltosa; - a natureza residual do solo; - a necessidade de abordagem conservadora;

Foi adotado o valor característico ϕ’ = 25º”.

“Considerando os valores estimados de Su, a literatura técnica e a prática corrente em projetos de pilha de estéril, adotou-se coesão efetiva correspondente à fração residual da resistência coesiva: c’ = 10 KPa”.

Não foi demonstrado como foi obtido o peso específico (ɣ) igual a 18 KN/m³.

Para a “fundação xisto” não foi demonstrado como obtido os valores de ɣ = 21 KN/m³, C’= 50 KPa e ϕ = 34 graus.

Conforme pode ser observado, os parâmetros geotécnicos informados para as fundações “argila” e “xisto” foram estimados e não derivados de ensaios geotécnicos de campo ou de laboratório, o que prejudica um cálculo confiável do fator de segurança das três pilhas. Somente a “fundação saprólito” teve seus dados obtidos por ensaios laboratoriais.

Este AFT conclui pela necessidade de manutenção da interdição das PDER 2, 4 e 5 ocorrida em 05/12/2025 até que novo cálculo de estabilidade física das pilhas seja elaborado considerando todos os materiais lançados (estéril, material fino e rejeitos), assim como a caracterização geotécnica completa dos mesmos. Somente dessa forma ter-se-á a convicção que as três pilhas se apresentam seguras para trabalhadores que transitam sobre elas, assim como para as comunidades que estão às margens do rio Piauí.

Belo Horizonte/MG, 04 de fevereiro de 2025.

Marcos Ribeiro Botelho
Auditor-Fiscal do Trabalho
CIF 35050-8