XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/35

Avaliação dos Recalques e das Distorções Admissíveis Considerando a Interação Solo-Estrutura em Transportadora de Correia de Longa Distância.

Jaime Andres Castañeda Barbosa
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, jaime.barbosa@bvp.eng.br

Paulo Roberto da Costa Cella
Diretor Técnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, paulo.cella@bvp.eng.br

Lucas Gonçalves de Faria
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.faria@bvp.eng.br

Pablo Fernando Sanchez
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, pablo.sanchez@bvp.eng.br

Mariane de Jesus Pereira da Silva
Engenheira Geotecnica, Vale, Belo Horizonte, Brasil, mariane5.silva5@vale.com

João Paulo Rodrigues da Costa
Engenheiro Geotecnico, Vale, Belo Horizonte, Brasil, joao.paulo.rodrigues@vale.com

RESUMO: Transportadoras de Correia de Longa Distância (TCLD) constituem infraestruturas essenciais em empreendimentos minerários, sendo responsáveis pelo transporte contínuo de minério desde a mina até as áreas de processamento ou disposição. A segurança estrutural dessas estruturas depende do controle rigoroso dos recalques e das distorções angulares nos elementos de fundação. Este trabalho apresenta a avaliação dos efeitos dos recalques diferenciais nas fundações de uma TCLD implantada sobre maciço sujeito a sobrecarga adicional decorrente da etapa final de alteamento da barragem adjacente. Foram adotados como critérios de desempenho limites admissíveis de distorção angular (< 1/500) e recalque (< 15 mm). Modelagens numéricas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), utilizando o Método dos Elementos Finitos e considerando explicitamente a interação solo - estrutura, foram empregadas para analisar o comportamento do sistema. As análises indicaram que a sobrecarga poderia gerar valores superiores aos limites estabelecidos, demandando a adoção de medidas corretivas, como o aprofundamento das estacas até horizonte geotécnico mais competente e ajustes no arranjo geométrico para redução da sobrecarga. Após a implementação das soluções propostas, os recalques diferenciais e as distorções angulares permaneceram dentro dos limites admissíveis, assegurando a segurança estrutural e a continuidade operacional da TCLD.
PALAVRAS-CHAVE: Distorções angulares; Recalques diferenciais; TCLD; Interação solo-estrutura ISE; Modelagem numérica.

ABSTRACT: Long-Distance Belt Conveyors (LDBC) are essential infrastructures in mining operations, responsible for the continuous transportation of ore from the mine to processing or disposal areas. The structural safety of these systems depends on strict control of settlements and angular distortions in foundation elements. This study presents an assessment of the effects of differential settlements on the foundations of an LDBC installed over a ground mass subjected to additional surcharge resulting from the final stage of raising of an adjacent dam. Serviceability criteria were defined as allowable angular distortion (< 1/500) and maximum absolute settlement (< 15 mm). Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) numerical models, developed using the Finite Element Method and explicitly considering soil–structure interaction, were employed to evaluate system behavior. The analyses indicated that the additional surcharge could produce values exceeding the established limits, requiring corrective measures such as extending the piles to a more competent geotechnical layer and adjusting the structural layout to reduce surcharge effects. After implementing the proposed solutions, differential settlements and angular distortions remained within allowable limits, ensuring structural safety and operational continuity of the LDBC system.

KEYWORDS: Angular distortion; Differential settlement; Long-distance belt conveyor (LDBC); Soil–structure interaction (SSI); Numerical modeling

1 INTRODUÇÃO

As correias transportadoras constituem sistemas essenciais para o transporte contínuo de materiais na mineração moderna, sendo amplamente empregadas em operações de cobre para o deslocamento de minério britado entre a frente de lavra e as plantas de beneficiamento. Em comparação ao transporte por caminhões, esses sistemas apresentam elevada eficiência energética e menores custos operacionais, especialmente em operações de grande porte e longas distâncias (CEMA, 2014).

Em empreendimentos dessa natureza, as correias frequentemente atravessam terrenos com topografia acidentada, incluindo vales encaixados, encostas e áreas previamente alteadas por pilhas de estéril ou aterros. As estruturas metálicas de suporte da TCLD são usualmente apoiadas sobre fundações em concreto, responsáveis pela transmissão das cargas ao maciço de apoio, que pode ser constituído por rocha, solo natural ou materiais compactados. A variabilidade geotécnica desses materiais pode resultar em distribuições não uniformes de tensões e deformações, favorecendo a ocorrência de recalques diferenciais entre bases adjacentes.

Segundo Terzaghi (1943), Das (2010) e Velloso e Lopes (2011), o desempenho de fundações depende tanto da capacidade de suporte quanto da deformabilidade do maciço de apoio. Dessa forma, a resposta estrutural do sistema está diretamente relacionada à interação entre a rigidez dos elementos de fundação e o comportamento mecânico do terreno.

A influência da Interação Solo-Estrutura (ISE) sobre a redistribuição de esforços e a ocorrência de recalques diferenciais tem sido amplamente discutida na literatura técnica (Gusmão, 1990; Antunes e Iwamoto, 2000; Ferro e Chueiri, 2000; Reis e Aoki, 2000). Com o avanço das técnicas de modelagem numérica, tornou-se possível representar de forma mais realista a transferência de cargas, a evolução dos deslocamentos e a resposta conjunta do sistema solo-fundação-estrutura (Gavioli, 2018).

Em estruturas lineares apoiadas sobre aterros ou solos naturais sujeitos a carregamentos variáveis e geometrias complexas, a modelagem tridimensional torna-se particularmente importante para a avaliação dos recalques diferenciais e das distorções angulares. O estudo de caso refere-se a uma TCLD existente localizada em área adjacente a uma barragem, cujas fundações passaram a ser influenciadas pelo maciço durante a etapa final de alteamento.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta análises numéricas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), desenvolvidas por meio do Método dos Elementos Finitos, com o objetivo de avaliar recalques e distorções angulares nas fundações da TCLD sob condição de sobrecarga adicional. Foram investigadas duas alternativas de intervenção: (i) o aprofundamento das estacas até horizontes geotécnicos mais competentes; e (ii) a redução da sobrecarga de enrocamento incidente sobre as fundações que apresentavam recalques superiores aos limites admissíveis.

2 METODOLOGIA

De acordo com o caso em estudo, a área de implantação do aterro e onde se localizam as bases existentes do TCLD passará por um processo de limpeza de fundação, com a remoção de materiais menos competentes, como o aterro existente e o solo residual, até a profundidade máxima de 4 metros. A fundação do novo aterro e das bases do TCLD deverá ser estabelecida predominantemente sobre solo residual de gnaisse e quartzito medianamente alterados, apresentando diferentes resistências mecânicas, conforme indicado pelos resultados dos ensaios de campo e de laboratório. Além de proporcionar uma melhor caracterização dos materiais de fundação do aterro, a distribuição espacial das sondagens na área permitiu a estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio de correlações empíricas e ensaios triaxiais de laboratório.

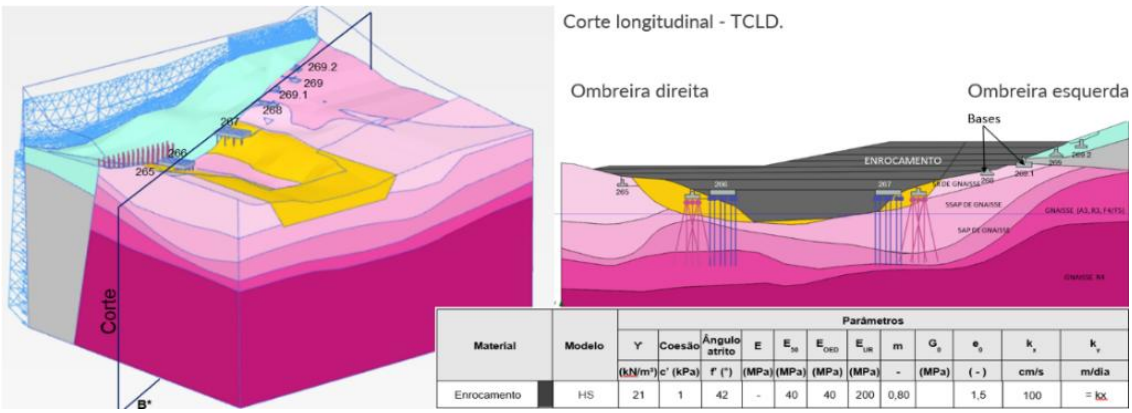
Para esse fim, foi desenvolvido um modelo geomecânico tridimensional dos materiais de fundação, das bases do TCLD e do próprio aterro (enrocamento), utilizando o software Leapfrog, incorporando as principais

condições geológicas, geotécnicas e estruturais identificadas. O modelo foi posteriormente refinado no Rhinoceros (Rhino) e importado para os softwares Plaxis 2D e Plaxis 3D, sendo subdividido em etapas construtivas, de modo a simular a execução do aterro até sua configuração geométrica final (Figura 1).



Figura 1. Etapas de construção do modelo numérico 3D (Leapfrog–Rhino–PLAXIS 3D).

Em seguida, o modelo foi discretizado em uma malha tridimensional de elementos finitos, na qual foram inseridos os parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais para o cálculo das tensões e deformações atuantes em cada etapa construtiva. Para o aterro de enrocamento, foi calibrado o modelo constitutivo avançado Hardening Soil Model (HSM), considerando os resultados de instrumentação obtidos por meio de inclinômetros. Para os demais materiais, foram adotados os modelos constitutivos de Mohr-Coulomb (para os solos) e Hoek-Brown (para a rocha). A Figura 2 apresenta o arcabouço do modelo geotécnico desenvolvido para dar suporte às análises tensão-deformação em 2D (corte longitudinal) e 3D. As duas bases que não estão atendendo aos limites admissíveis são as bases 268 e 269.1, indicadas na Figura 2.



Material	Modelo	Parâmetros											
		γ	Coesão	Ângulo atrito	E	E_{50}	E_{OED}	E_{UR}	m	G_0	e_0	k_x	k_y
		(kN/m³)	c' (kPa)	f' (°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	-	(MPa)	(-)	cm/s	m/dia
Enrocamento	HS	21	1	42	-	40	40	200	0,80		1,5	100	= kx

Figura 2. Bases do TCLD modelagem numerica 2D e 3D (PLAXIS 3D, 2025.1).

As fronteiras dos modelos numéricos tridimensionais foram definidas com restrição de deslocamentos horizontais nas direções laterais (+x, -x, +y, -y), permitindo deslocamentos livres na direção vertical (+z, -z) nessas mesmas fronteiras. Na fronteira inferior (zmin), foram consideradas restrições aos deslocamentos verticais, permitindo-se, contudo, a liberdade de deslocamento nas direções horizontais. Já na fronteira superior, o modelo admite deslocamentos livres em todas as direções. As condições de poropressão foram definidas com base em uma superfície freática hidrostática, obtida a partir da extrusão da linha freática adotada nos modelos bidimensionais de equilíbrio limite e nos estudos tensão-deformação tridimensionais do maciço global. Essa linha foi extraída das seções de referência de cada modelo tridimensional, sendo selecionada conforme a seção mais representativa da faixa analisada (Figura 3).

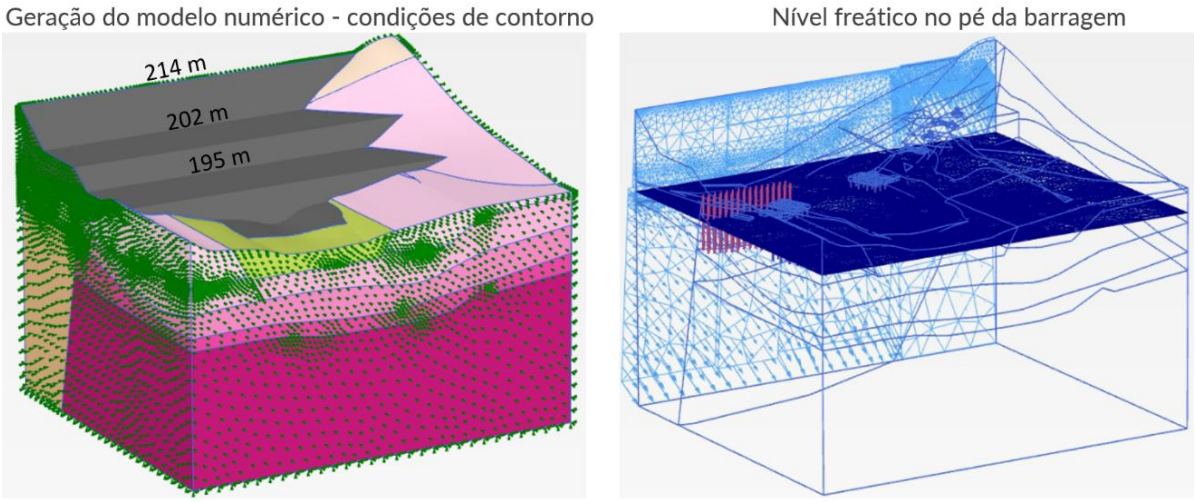


Figura 3. Condições de contorno modelagem 3D e nivel d'água (PLAXIS 3D, 2025.1).

Finalmente, no modelo tridimensional de estudo, foram simuladas as construções das bancadas de alteamento nas elevações 195 m, 202 m e 214 m (Sobrecarga no TCLD existente). As demais etapas de alteamento foram representadas por meio da aplicação de carregamentos de fronteira.

Esse carregamento de fronteira, que simula os efeitos das fases superiores de alteamento, foi aplicado em três frações progressivas, correspondentes a 33%, 66% e 100% do carregamento total predefinido para a elevação final, de modo a garantir o equilíbrio entre as etapas simuladas (Figura 4).

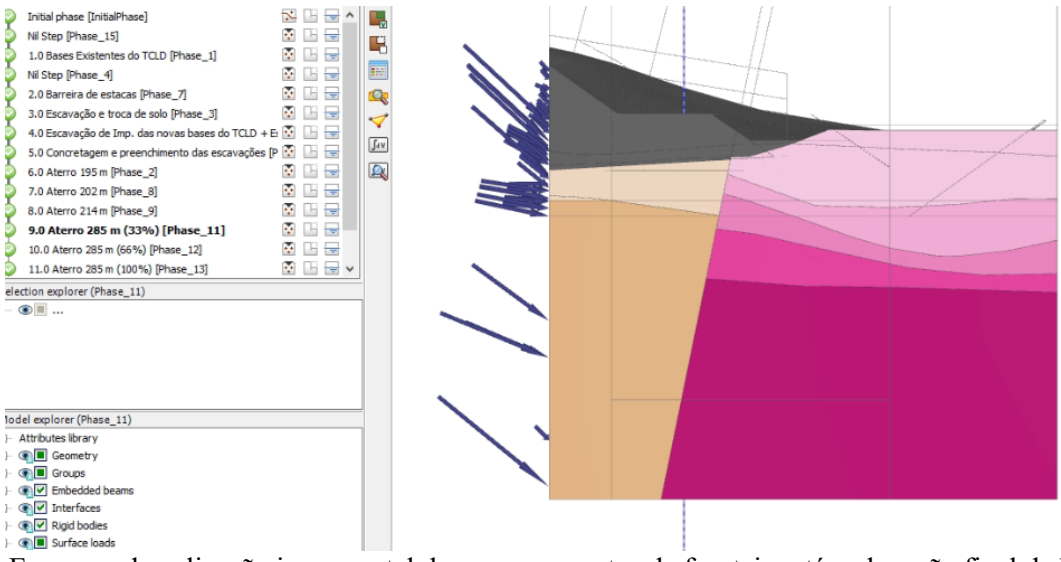
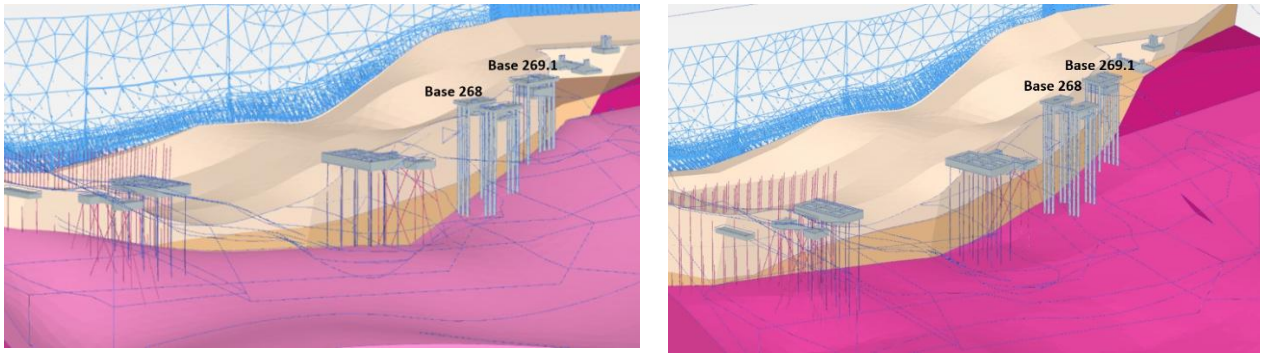


Figura 4. Esquema de aplicação incremental dos carregamentos de fronteira até a elevação final da barragem de enrocamento (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

2.1 Estacas de fundação bases LC-268 e LC-269.1

Para viabilizar o início do alteamento no cenário final de construção, foi implementado um reforço por meio de estacas nas bases LC-268 e LC-269.1, com o objetivo de reduzir os recalques verticais e garantir o atendimento aos limites admissíveis de serviço. Na primeira alternativa, as estacas foram dimensionadas para apoio em solo saprolítico de gnaisse, enquanto na segunda alternativa previu-se o apoio em gnaisse medianamente alterado, considerado mais competente. As profundidades das estacas variaram entre 18 m (apoio no solo saprolítico de gnaisse) e 23 m (apoio no gnaisse medianamente alterado), conforme ilustrado na Figura 5.



(a) Comprimento das estaca de 18 m – apoiada sobre solo Saprolitico de Gnaisse

(b) Comprimento das estaca de 23 m – apoiada sobre Gnaisse medianamente alterado

Figura 5. Estaqueamento nas bases 268 e 269.1 do TCLD (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

2.2 Novo Arranjo Geometrico acima das bases LC-268 e LC-269.1

Outra alternativa avaliada consistiu na adoção de um novo arranjo geométrico do enrocamento situado acima das bases LC-268 e LC-269.1. Esse arranjo considerou a redução da altura do maciço em aproximadamente 5 m sobre essas bases, por meio da supressão de um volume de 5.068 m³ de enrocamento, adotando-se uma inclinação V:H de 1:1,5. A proposta teve como objetivo atender aos critérios de desempenho estabelecidos para o projeto, garantindo que os recalques permanecessem dentro dos limites admissíveis de serviço, bem como promovendo a redução dos deslocamentos horizontais no entorno das fundações da estrutura do TCLD (Figura 6).

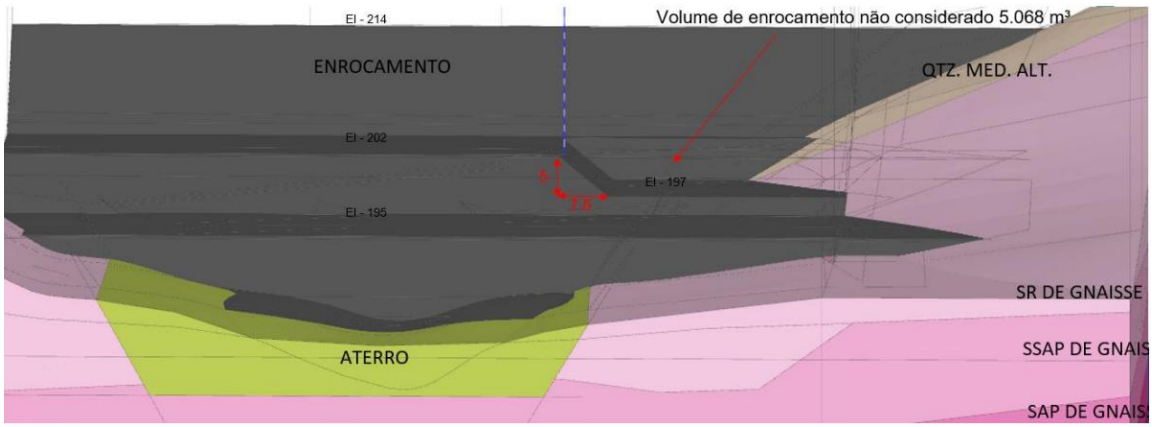


Figura 6. Vista frontal do novo arranjo geométrico na elevação final da barragem de enrocamento (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

3 RESULTADOS DA MODELAGEM NUMERICA 3D

As análises preliminares evidenciaram recalques acima dos valores admissíveis nas bases LC-268 e LC-269.1 (Figura 7). Em função disso, foram estudadas alternativas de adequação das fundações dessas bases.

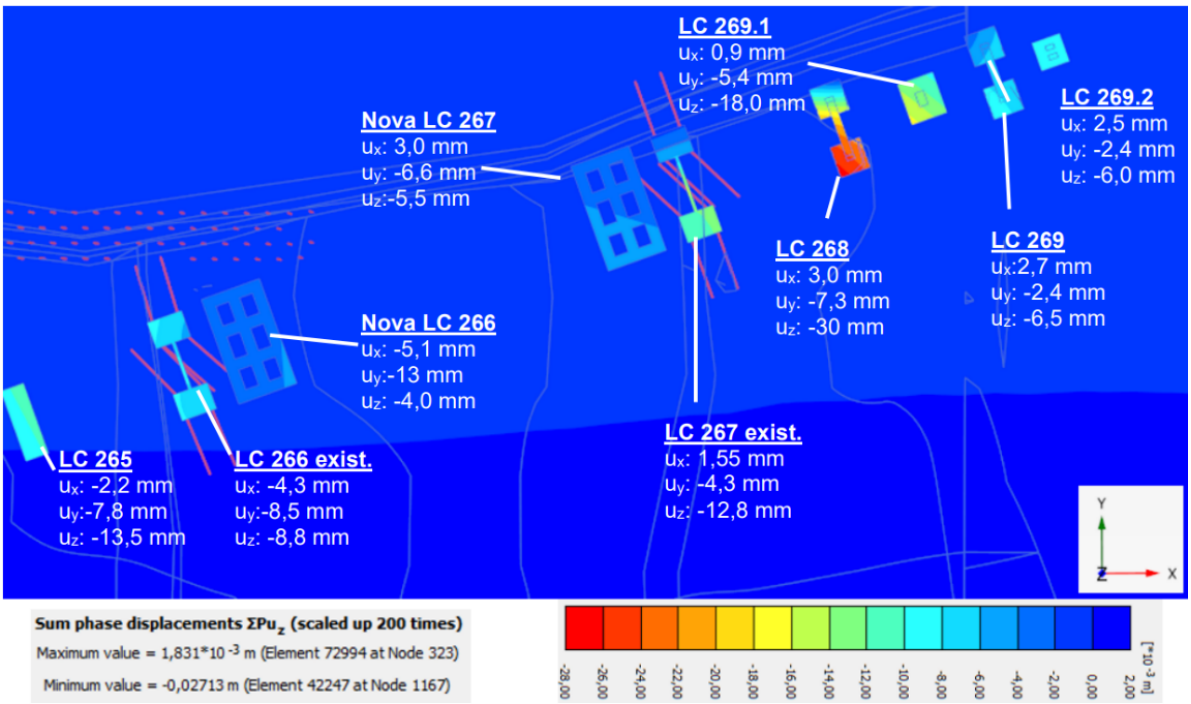
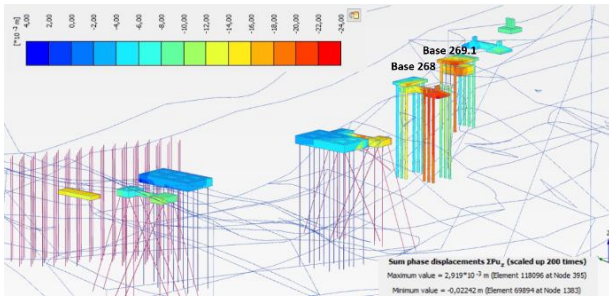


Figura 7. Resultados dos deslocamentos horizontais e verticais nas bases do TCLD – vista de planta (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

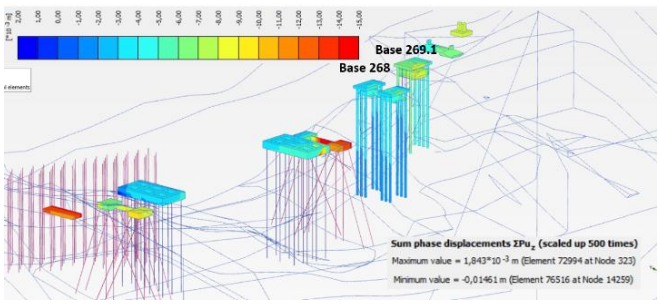
3.1 Resultados das Estacas de fundação bases LC-268 e LC-269.1

Considerando a alternativa de reforço por estacas, observa-se uma leve redução nos recalques e deslocamentos para estacas com comprimento de 18 m, apoiadas sobre solo saprolítico de gnaisse. No entanto, essa solução ainda não atendeu aos valores admissíveis estabelecidos em projeto Figura 8(a).

Diante disso, propôs-se o aprofundamento das estacas para 23 m, com apoio em gnaisse medianamente alterado, litotipo considerado mais competente em relação ao anterior. Nessa configuração, verificaram-se valores de recalque e deslocamento dentro dos limites admissíveis de projeto nas bases do TCLD Figura 8(b).
.



(a) Comprimento das estaca de 18 m – apoiada sobre solo saprolítico de Gnaisse – E = 120,0E3 (Kn/m²)



(b) Comprimento das estaca de 23 m – apoiada sobre Gnaisse medianamente alterado – E =10,90E6 (Kn/m²)

Figura 8. Resultados dos deslocamentos horizontais e verticais nas bases do TCLD – vista de planta (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

3.1 Resultados do Novo Arranjo Geometrico acima das bases LC-268 e LC-269.1

Observa-se uma redução dos deslocamentos nas três direções (ux, uy e uz) quando comparado ao modelo inicial de estudo. As componentes horizontais e verticais mantiveram os mesmos sentidos de

deslocamento e apresentaram valores de recalque vertical dentro dos limites admissíveis, todos inferiores a 15 mm, para esse novo arranjo geométrico (Figura 9).

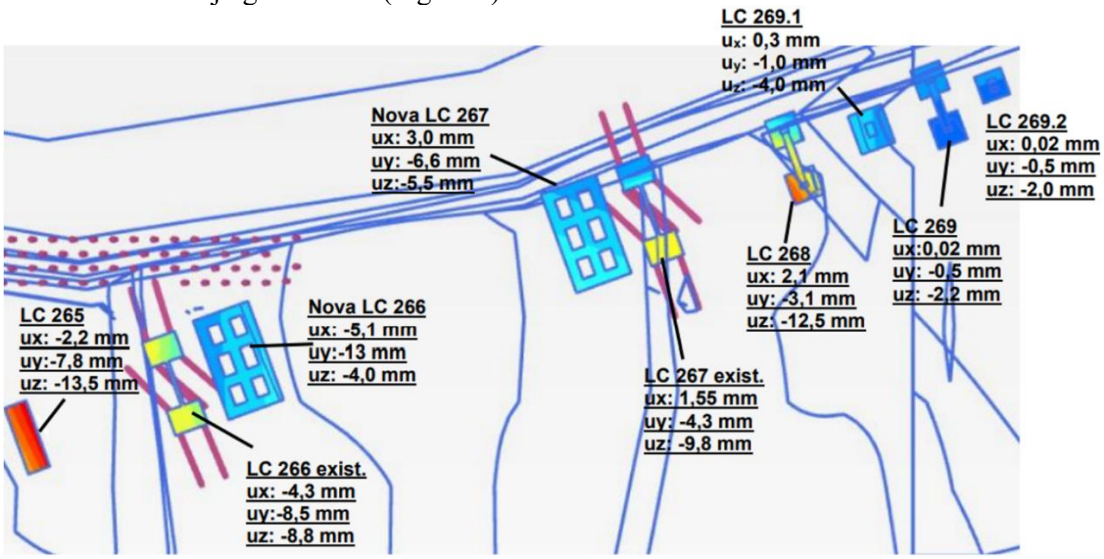


Figura 9. Novo arranjo geometrico acima das bases do TCLD LC-268 e LC-269.1 – vista de planta (PLAXIS 3D, versão 2025.1).

3.1 Distorções Angulares no Novo Arranjo Geometrico acima das bases LC-268 e LC-269.1

As distorções angulares entre as bases LC-268 e LC-269.1 do TCLD são apresentadas na Figura 10, correspondendo aos valores obtidos nas sapatas após a etapa final de construção. O valor resultante, da ordem de 1/1000, encontra-se dentro dos limites considerados seguros segundo a literatura técnica e as normas vigentes, não indicando potencial para ocorrência de danos estruturais.

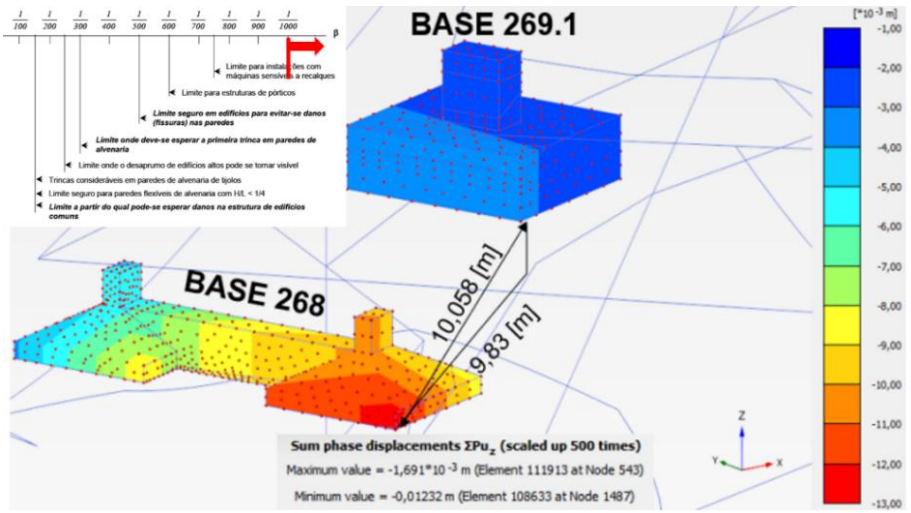


Figura 10. Distorções angulares no novo arranjo geometrico nas bases do TCLD 268 e 269.1 – elevação final.

Resultado distorção angular: $\beta = |\ ^{0,009}/_{9,83}\ | = 0.000915\ aproximadamente\ 1/1000$

4 CONCLUSÕES

As análises indicaram que, na condição inicial, os recalques verticais nas bases da TCLD atingiram valores de até 30 mm, superiores aos limites admissíveis, em função do incremento de tensões decorrente da

fase final de alteamento da barragem. Duas alternativas foram avaliadas: o aprofundamento das estacas até horizonte geotécnico mais competente e a redução da sobrecarga de enrocamento nas bases críticas. A solução com estacas mostrou-se tecnicamente robusta, reduzindo o recalque máximo para aproximadamente 12 mm. Entretanto, sua execução em campo apresenta maior complexidade construtiva, especialmente em área com geometria restritiva e declividades acentuadas. A alternativa baseada na redução da sobrecarga atingiu os resultados esperados com menor intervenção executiva, mantendo os recalques e distorções angulares dentro dos limites admissíveis e preservando os critérios de estabilidade da barragem. Dessa forma, mostrou-se mais adequada sob a ótica técnico-construtiva e operacional.

Com base nas análises estruturais realizadas para a estrutura de transporte por correia de longa distância (TCLD), conclui-se que os recalques verticais e as distorções angulares observados encontram-se dentro dos limites admissíveis recomendados por boas práticas de engenharia e referências normativas. Considerando a necessidade de garantir o pleno funcionamento do sistema transportador especialmente no que diz respeito ao alinhamento da correia, desempenho dos componentes móveis e integridade estrutural foram adotados os seguintes critérios de verificação:

• Recalque diferencial admissível: limitado a 25 mm, sendo recomendável a adoção de valores mais restritivos (≤ 15 mm) em regiões críticas, como cambotas, tambores de acionamento e esticadores. Distorção angular admissível: limitada a 1/500 a 1/1000, equivalente a variações angulares máximas entre 2 mm/m e 1 mm/m entre apoios.

• As análises numéricas e as avaliações de campo indicaram que as deformações da fundação permanecem dentro desses critérios, assegurando a estabilidade da estrutura metálica e o desempenho funcional do sistema transportador. Recomendase, ainda, a continuidade do acompanhamento por meio de instrumentação geotécnica e inspeções periódicas, de modo a retroalimentar os modelos de previsão e garantir o desempenho ao longo da vida útil da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BVP e à Vale pela disponibilização dos dados, incentivo e materiais utilizados neste estudo, bem como à PUC-Rio pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes, H. M. C. C.; Iwamoto, R. K. *Um modelo de interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda.* In: XXII CILAMCE, 2000. Anais... CD-ROM, 2000.

Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA). *Belt Conveyors for Bulk Materials*. 7th ed. Naples, FL: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2014.

Das, Braja M. *Principles of Geotechnical Engineering*. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2010. Disponível em: https://www.cengage.com/c/principles-of-geotechnical-engineering-7e-das/. Acesso em: 18 fev. 2026.

Ferro, N. C. P.; Chueiri, L. H. M. *Um modelo para análise de interação solo-fundação-superestrutura*. In: XXIX Jornada Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 2000. Anais, 2000.

Gavioli, F. M. *Estudo de caso da fundação de uma unidade aerogeradora*. 2018. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

Gusmão, A. D. *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. 1990. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1990.

Reis, J. H. C.; AOKI, N. *Análise de interação solo-estrutura em maciço de argila mole.* In: I Simpósio de Interação Estrutura-Solo, 2000, São Carlos, SP. Anais... São Carlos: USP-EESC, 2000. CD-ROM.

Terzaghi, Karl. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943. Disponível em: https://archive.org/details/theoreticalsoilmechanics. Acesso em: 18 fev. 2026.

Velloso, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.