



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

ANDERSON NASCIMENTO MILAGRES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE REFORÇO EM BARRAGEM DE REJEITOS
COM ESTACAS METÁLICAS CRAVADAS POR TÉCNICA *PRESS-IN***

Tucuruí - PA
2025

ANDERSON NASCIMENTO MILAGRES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE REFORÇO EM BARRAGEM DE REJEITOS
COM ESTACAS METÁLICAS CRAVADAS POR TÉCNICA *PRESS-IN***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Débora Dias Costa
Moreira.

Tucuruí - PA
2025

ANDERSON NASCIMENTO MILAGRES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE REFORÇO EM BARRAGEM DE REJEITOS
COM ESTACAS METÁLICAS CRAVADAS POR TÉCNICA *PRESS-IN***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Débora Dias Costa Moreira.

Tucuruí, 26 de agosto de 2025.

Aprovado por:

Prof.^a Dr.^a Débora Dias Costa Moreira

Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí – NDAE/PEBGA
(Orientadora)

Prof.^o Dr. Marcelo Rassy Teixeira

Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí – NDAE/PEBGA
(Examinador Interno)

Prof.^o Dr. Eduardo Souza Cândido

Universidade Federal de Lavras – PPGEAMB
(Examinador Externo)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M637p Milagres, Anderson Nascimento.
Proposta metodológica de reforço em barragem de rejeitos com estacas metálicas cravadas por técnica Press-in / Anderson Nascimento Milagres. — 2025.
xiii, 74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Débora Dias Costa Moreira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2025.

1. Barragens de Rejeito. 2. Reforço Geotécnico. 3. Estacas Metálicas. 4. Método Press-In. 5. Estabilidade de Barragens. I. Título.

CDD 627.83

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter guiado meus passos, iluminado meu caminho e nunca ter me desamparado.

À minha futura esposa, Emily: este trabalho só foi possível graças ao seu apoio incondicional. Você me motivou, me fortaleceu e esteve ao meu lado até mesmo quando eu já havia desistido. Obrigado por acreditar em mim.

Aos meus pais, à minha irmã, meus sobrinhos e a toda minha família, pela educação, pelos valores e pelo apoio constante. Vocês são os pilares da minha trajetória, e é reconfortante saber que sempre posso contar com vocês.

Aos amigos da FONNTES, obrigado pelos momentos de desabafo, pelas trocas de conhecimento, pelo incentivo e, sobretudo, pela paciência ao longo dessa jornada.

À FONNTES GEOTÉCNICA, com especial agradecimento ao Michel, Michelle e Gladys: vocês são referências de excelência profissional. Sempre focados na técnica e na busca por inovação, foram fundamentais na minha formação. Esta dissertação reflete diretamente a marca da FONNTES — conhecimento, pioneirismo e comprometimento. Muito obrigado por fazerem parte dessa conquista.

À minha orientadora, Professora Débora, agradeço pela orientação, incentivo e apoio ao longo deste período. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

“...Tudo é possível àquele que crê.”

Marcos 9:23

RESUMO

Nas últimas décadas, o rompimento de barragens de mineração no Brasil provocou mudanças significativas na legislação e nas práticas de segurança para disposição de rejeitos. A publicação de normativas como a Resolução ANM nº 95/2022 e a alteração da Lei nº 12.334/2010 impuseram restrições à continuidade de estruturas alteadas a montante, exigindo seu reforço ou descaracterização. Em resposta, o setor mineral passou a buscar alternativas viáveis para garantir a estabilidade dessas estruturas, especialmente diante de limitações operacionais, ambientais e de segurança. Entre as soluções investigadas, destaca-se o uso de estacas metálicas cravadas por método de prensagem (Press-in), tecnologia amplamente aplicada internacionalmente e com vantagens relevantes, como baixos níveis de ruído e vibração, elevada capacidade resistente e facilidade de execução em terrenos diversos. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da aplicação de estacas metálicas tubulares como reforço de barragens de rejeito, utilizando a tecnologia Press-in. Para isso, propõe-se uma metodologia de dimensionamento adaptada às condições brasileiras, considerando as especificidades geotécnicas e normativas locais. Como aplicação prática, é apresentado o dimensionamento de uma estrutura de reforço hipotética, demonstrando a aplicabilidade da metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de Rejeito, Reforço Geotécnico, Estacas Metálicas, Método Press-In, Estabilidade de Barragens.

ABSTRACT

In recent decades, the failure of mining tailings dams in Brazil has led to significant changes in legislation and safety practices related to tailings disposal. The enactment of regulations such as ANM Resolution No. 95/2022 and the amendment of Federal Law No. 12,334/2010 have imposed restrictions on the continued use of upstream-raised structures, requiring their reinforcement or decharacterization. In response, the mining sector has sought feasible alternatives to ensure the stability of these structures, especially given operational, environmental, and safety constraints. Among the solutions investigated, the use of steel piles installed using the Press-in method stands out. This technology is widely applied internationally and offers several advantages, including low noise and vibration levels, high load-bearing capacity, and ease of installation in various soil types. This study aims to assess the technical feasibility of using tubular steel piles as reinforcement for tailings dams, employing the Press-in method. A design methodology adapted to Brazilian conditions is proposed, taking into account local geotechnical and regulatory requirements. As a practical application, the design of a hypothetical reinforcement structure is presented to demonstrate the applicability of the proposed methodology.

KEYWORDS: Tailings Dams, Geotechnical Reinforcement, Steel Piles, Press-In Method, Dam Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Evolução do número de barragens em Nível de Emergência ao longo do tempo.....	1
Figura 2– Obras de reforço da Barragem Santana, em Itabira/MG.....	8
Figura 3– Ilustração da obra de reforço da Barragem 7, em Jeceaba/MG.	8
Figura 4– Principais tipos de estacas metálicas.....	10
Figura 5– Comparação do desempenho de diferentes perfis de estacas metálicas.....	11
Figura 6– Modelo computacional representando o deslocamento verificado no estágio 5 no tempo 4,57 s.....	12
Figura 7– Cravação de estaca metálica com bate estaca.	14
Figura 8– Cravação de estaca metálica com martelo vibratório.....	15
Figura 9– Cravação de estaca metálica com a metodologia <i>Press In</i> : a) Princípio do método de instalação <i>Press in</i> ; b) Cravação de estaca metálica por <i>Press in</i>	16
Figura 10– Sistema de lubrificação através de jato d’água - <i>Fitting</i> : a) Esquema de funcionamento do <i>Fitting</i> ; b) <i>Fitting</i> implantado em uma estaca tubular.....	17
Figura 11– Estacas tubular com brocas metálicas soldadas (coroas), dotadas de elementos cortantes (<i>bits</i>) e sistema de jateamento de água (<i>fitting</i>).....	19
Figura 12– Procedimento inicial de cravação.	20
Figura 13– Equipamento posicionado com os contrapesos de concreto pré-moldado para iniciar o processo de cravação.	21
Figura 14– Etapas de Instalação das Estacas com Equipamento <i>Press-in</i>	22
Figura 15– Equipamentos que compõe o sistema GRB.	23
Figura 16– Gráfico comparativo dos níveis de ruídos induzidos pela utilização de diferentes métodos para cravação de estacas.	25
Figura 17– Fluxograma de dimensionamento do reforço com estacas.	32
Figura 18– Seção geológica-geotécnica fictícia.	33
Figura 19– Modelo numérico.	34
Figura 20– Detalhe da implantação da estaca na análise de percolação.	36
Figura 21– Condições de Contorno.....	38
Figura 22– Malha de Elementos Finitos.....	38
Figura 23– Equipotenciais e linhas de fluxo – Antes da implantação do reforço.....	48
Figura 24– Equipotenciais e linhas de fluxo – Após implantação de reforço.....	48
Figura 25– Nível freático cenário sem estaca (linha preta e tracejada) e cenário com estaca (linha azul contínua) - Região de alteração mais significativa.....	49

Figura 26– Verificação de gradiente hidráulico após implantação de reforço	50
Figura 27– Verificação de gradiente hidráulico após implantação de reforço e dreno invertido	51
Figura 28 – Máxima deformação cisalhante – Condição Drenada sem Reforço	53
Figura 29 – Máxima deformação cisalhante – Cravação das Estacas – Drenada.....	54
Figura 30 – Máxima deformação cisalhante – Reforçada com Estacas – Não Drenada.....	55
Figura 31 – Máxima Deformação Cisalhante – Detalhamento – Cenário Reforçado com Estacas	56
Figura 32 – Deslocamentos Totais – Cravação das Estacas - Drenada.....	57
Figura 33 – Deslocamentos Totais – Reforçada com Estacas – Não Drenada.....	58
Figura 34 – Deslocamentos Totais – Detalhamento – Cenário Reforçado com Estacas.....	59
Figura 35 – Zonas de Plastificação – Condição Drenada sem Reforço.....	60
Figura 36 – Zonas de Plastificação – Cravação das Estacas – Drenada.....	61
Figura 37 – Zonas de Plastificação – Reforçada com Estacas – Não Drenada	62
Figura 38 – Zonas de Plastificação – Reforçada com Estacas	63
Figura 39 – Diagrama de momento – Avaliação Estrutural	64
Figura 40 – Diagrama do esforço cortante –Avaliação Estrutural	64
Figura 41 – Método SSR – <i>Critical</i> SRF – Destaque para linha preta representando cunha da análise de estabilidade.	65
Figura 42 – Análise de estabilidade – Condição Drenada.....	67
Figura 43 – Análise de estabilidade – Condição Não Drenada de Pico	67
Figura 44 – Análise de estabilidade – Condição Pseudoestática.....	67
Figura 45 – Análise de estabilidade – Condição Drenada.....	68
Figura 46 – Análise de estabilidade – Condição Não Drenada de Pico	69
Figura 47 – Análise de estabilidade – Condição Pseudoestática.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidades de vibração de partículas gerados pelos diferentes métodos para cravação de estacas.....	26
Tabela 2 – Valores de referência para o coeficiente de correção α do valor do módulo de elasticidade	27
Tabela 3 – Parâmetros de permeabilidade e razão de anisotropia dos materiais.....	35
Tabela 4 – Permeabilidade equivalente para as regiões de implantação das estacas	35
Tabela 5 – Parâmetros atribuídos às estacas.....	39
Tabela 6 – Módulos de Elasticidade e Poisson dos materiais	39
Tabela 7 – Valores de referência para o coeficiente de redução Rinter (Brinkgreeve e Shen 2011).....	41
Tabela 8 – Parâmetros interface solo-estrutura.	41
Tabela 9 – Momento Fletor Admissível.....	43
Tabela 10 – Esforço Cortante Admissível.....	44
Tabela 11 – Parâmetros de resistência dos materiais	45
Tabela 12 – Fatores de segurança mínimos exigidos pelas normas para os diferentes cenários de análises de estabilidade.....	45
Tabela 13 – Valores calculados para obtenção do comprimento de embutimento	47
Tabela 14 – Gradiente Hidráulico – Seções de controle	50
Tabela 15 – Gradiente Hidráulico – Seções de controle – após implantação do dreno invertido	51
Tabela 16 – Resultados da Análise de Tensão x Deformação – Condição Final	66
Tabela 17 – Resultados da Análise de Equilíbrio Limite – Condição inicial.....	66
Tabela 18 – Resultados da Análise de Equilíbrio Limite – Condição final	68

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
FS	Fator de Segurança
GRB	<i>Giken Reaction-Based</i>
IPA	<i>International Press-in Association</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NSPT	Índice de Resistência à Penetração do Solo
PAE	Planos de ação de emergência
PAEBM	Planos de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PPV	<i>Peak Particle Velocity</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	JUSTIFICATIVA	4
3	OBJETIVOS	5
3.1	OBJETIVO GERAL	5
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4	REFERENCIAL TEÓRICO	6
4.1	MARCOS REGULATÓRIOS	6
4.2	PROPOSTAS PARA REFORÇO DE BARRAGEM	7
4.2.1	<i>Reforço de barragem com aterro compactado</i>	7
4.2.2	<i>Reforço de barragem com estacas metálicas</i>	9
4.2.2.1	Estruturas de Contenção a Jusante utilizando a metodologia Press In	11
4.3	MÉTODOS PARA CRAVAÇÃO DAS ESTACAS METÁLICAS	13
4.3.1	<i>Cravação por percussão</i>	13
4.3.2	<i>Cravação por vibração</i>	14
4.3.3	<i>Cravação por prensagem estática – Press In</i>	15
4.3.3.1	Sistema de jato de água - <i>Fitting</i>	16
4.3.3.2	Sistema de pressão rotativa - <i>Gyropress</i>	18
4.3.3.3	Base de reação	19
4.3.3.4	Etapas de Instalação das Estacas com Equipamento <i>Press-in</i>	21
4.3.3.5	Sistema GRB - <i>Giken Reaction-Based System</i>	22
4.3.4	<i>Comparação entre os métodos de cravação</i>	23
4.4	METODOLOGIA IPA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS	26
5	METODOLOGIA.....	30
5.1	METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM ESTACAS EM UMA BARRAGEM DE REJEITOS	33
5.1.1	<i>Análise de Percolação</i>	33
5.1.1.1	Condições de contorno	34
5.1.1.2	Erosão progressiva.....	36
5.1.2	<i>Análise tensão x deformação</i>	37
5.1.2.1	Condições de contorno	37
5.1.2.2	Interface solo-estrutura de contenção	40

5.1.2.3	Estágios de análise.....	41
5.1.2.4	Deslocamento máximo admissível.....	42
5.1.2.5	Momento máximo admissível.....	42
5.1.2.6	Força cisalhante máxima admissível.....	43
5.1.2.7	Verificação de zonas de plastificação.....	44
5.1.2.8	Fatores de segurança por <i>Shear Strength Reduction</i> – SSR.....	44
5.1.3	<i>Análise de equilíbrio limite</i>	44
5.1.3.1	Estágios de análise.....	45
5.1.3.2	Fatores de segurança.....	45
6	RESULTADOS	47
6.1	ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DE EMBUTIMENTO DA ESTRUTURA.....	47
6.1.1	<i>Metodologia IPA</i>	47
6.2	DIMENSIONAMENTO POR METÓDOS NUMERICOS.....	48
6.2.1	<i>Análise de percolação</i>	48
6.2.2	<i>Análise tensão x deformação</i>	51
6.2.2.1	Máxima deformação cisalhante.....	53
6.2.2.2	Deslocamentos Totais.....	57
6.2.2.3	Zonas de Plastificação.....	60
6.2.2.4	Avaliação estrutural – Momento e Força Cisalhante.....	64
6.2.2.5	Fatores de segurança por <i>Shear Strength Reduction</i> – SSR.....	65
6.2.2.6	Discussão dos resultados da análise de tensão x deformação.....	65
6.2.3	<i>Análise de equilíbrio limite</i>	66
6.2.3.1	Condição atual.....	66
6.2.3.2	Condição final – Reforço implantado.....	68
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A última década foi marcada por dois grandes rompimentos ocorridos em barragens de mineração, no estado de Minas Gerais, responsáveis por mudanças significativas na legislação estadual e federal, e nas técnicas para disposição de rejeitos de mineração.

Nesse contexto, em âmbito federal, foi publicada a Resolução da Agência Nacional de Mineração – ANM nº 4, revogada pela Resolução nº 13, ambas de 2019 (ANM, 2019a e 2019b) e posteriormente revogada pela Resolução nº 95 de 2022 de abrangência nacional, que estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade das barragens de mineração. Essa resolução foi implementada em articulação com a Lei Federal nº 12.334 de 2010 (BRASIL, 2010), alterada pela Lei Federal 14.066 de 2020 (BRASIL, 2020), que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

Além da proibição da construção de novas estruturas alteadas pelo método à montante, foi definido que, as barragens já existentes construídas por essa metodologia, precisariam ser descaracterizadas, podendo ser necessário uma etapa preliminar de reforço. Em resposta as novas diretrizes e critérios, os empreendedores se viram na obrigação de atualizar as suas bases de informações geológico-geotécnicas e melhor entendimento das condições de contorno que estabelecem a segurança geotécnicas e hidráulica das estruturas, desativadas ou não. Como parte desse processo, foram iniciadas novas campanhas investigativas e estudos de suscetibilidade a liquefação dos materiais que compõe as barragens (maciço, reservatórios e fundação), visto que essa condição levou a ruptura dos casos supracitados. Como consequência, diversas estruturas foram declaradas em nível de emergência conforme estabelecido pelas normativas supracitadas (Figura 1), com fatores de segurança abaixo do normativo (NBR 13.028/2024), acarretando a necessidade de reforça as estruturas.

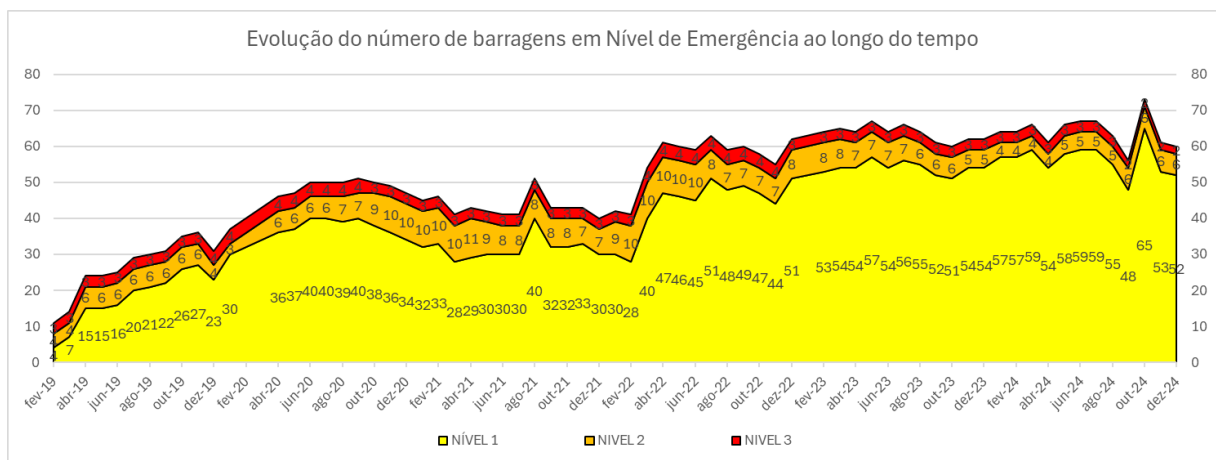


Figura 1– Evolução do número de barragens em Nível de Emergência ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de ANM (2024).

Os prazos reduzidos estabelecidos pela legislação para execução de reforços estruturais, em especial o limite de 31 de dezembro de 2025, definido pela Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, somados à indisponibilidade de áreas e a restrições de natureza construtiva, impuseram desafios significativos ao planejamento e execução das intervenções. Entre essas restrições, destacam-se a geração de ruídos, em função da proximidade de determinadas estruturas a áreas residenciais, e a indução de vibrações capazes de atuar como potenciais gatilhos para o processo de liquefação e, conseqüentemente, para a instabilização dos barramentos. Diante desse cenário, tornou-se imprescindível a busca por alternativas inovadoras que viabilizassem tanto a execução dos reforços quanto o desenvolvimento de projetos de descaracterização.

Nesse cenário, as mineradoras iniciaram estudos prevendo a utilização do método press in como elemento construtivo dos reforços, tendo como vantagens:

- geração de pouca perturbação ou vibrações no terreno;
- prazos de entrega da obra reduzidos (no caso de perfis de seção comercial);
- facilidade de transporte e manuseamento dos materiais para construção;
- facilidade em executar emendas e cortes;
- possibilidade de execução de comprimentos diferenciados;
- elevada resistência à compressão, flexão e corte;
- permite instalação em rocha de resistência elevadas;
- elevado controle de qualidade durante as etapas construtivas.

Essa metodologia é amplamente utilizada no processo de construção de muros para proteção contra tsunamis no Japão, e em obras de estabilização de encostas em zonas urbanas, principalmente no Japão e Europa, conforme Giken (2025), Dobrisan (2018), além da utilização para Estruturas de Contenção a Jusante (ECJ), conforme Viel (2022) e Santos e Futai (2021). Em função das características de resistência do terreno de fundação, pode ser necessária para a cravação das estacas a associação do método Press in à técnica de rotação (Gyropress), mediante a utilização de equipamentos de cravação específico. Neste caso, as estacas tubulares podem ser associadas a elementos de corte na ponta, fato que possibilita a cravação em materiais resistentes, tais como rochas ou estruturas de concreto (ISHIHARA, 2018) (RANDOLPH, 2021).

Segundo Viel (2022) as vantagens do referido método relacionam-se com:

- baixos níveis de vibrações, podendo ser instaladas sobre barramentos em risco e próximo de residências, minimizando, assim, os impactos às estruturas adjacentes;

- baixos níveis de ruídos, diminuindo o incômodo à população do entorno e possibilitando até mesmo a execução da obra no período noturno, otimizando o tempo de construção;
- facilidade de cravação em quase todos os tipos de terrenos;
- minimização dos danos à jusante, uma vez que podem ser fixadas no maciço da barragem

Diante das vantagens da utilização de estacas metálicas e do método de prensagem, buscar-se-á com este trabalho, apresentar uma análise de viabilidade técnica da utilização de estacas tubulares metálicas para reforço de uma barragem de rejeitos alteada a montante. Será apresentada uma proposta metodológica para o dimensionamento deste tipo de estrutura em território nacional, abordando as particularidades e adaptações necessárias. Além disso, ainda será apresentado o dimensionamento de uma estrutura de reforço fictícia, projetada segundo a metodologia a ser apresentada nos capítulos seguintes.

2 JUSTIFICATIVA

Conforme discorrido anteriormente, existe atualmente a necessidade de implantação de reforços para as barragens de rejeitos declaradas instáveis, de maneira a buscar a condição de estabilidade preconizadas nas normativas, ao meio ambiente e principalmente à vida da população residente nas áreas diretamente afetadas, durante o processo de descaracterização. O artigo 54 e 58 da Resolução ANM nº 95 de 2022, aborda sobre essa necessidade de reforço e descaracterização das estruturas alteadas a montante.

Dessa forma, observa-se a necessidade de consolidar e ampliar alternativas para implantação de estruturas para reforço de barragens de rejeitos em condição não drenada, em especial com a utilização de estacas metálicas cravadas pela técnica Press In. Destaca-se ainda mais essa necessidade, visto a inexistência de trabalhos publicados com esse viés de reforço de estruturas com essa técnica.

Neste contexto, o trabalho se justifica por apresentar discussões e análises sobre o tema, a partir da apresentação de uma estrutura de reforço construída em estacas metálicas. A escolha desta alternativa está associada à possibilidade de o reforço ser implantadas sobre o maciço da barragem gerando o mínimo de vibrações e ruídos durante a instalação, além de ocuparem menores áreas. Pretende-se por meio deste, propor uma metodologia para o dimensionamento dessas estruturas de reforço. O método sugerido, será uma adaptação às condições e legislações brasileiras, da metodologia japonesa de dimensionamento destas estacas, apresentada pelo manual *Press-in retaining structures: a handbook* (IPA, 2019).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é apresentar uma proposta metodológica para o dimensionamento de estacas metálicas instaladas (cravadas) pelo método de prensagem (*Press in*), para a construção de reforço em uma barragem de rejeitos com problemas em condição não drenada vide os aspectos geológicos geotécnicos do território brasileiro.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos para a realização deste trabalho são:

- ✓ Análise de viabilidade técnica da utilização de estacas tubulares metálicas para reforço de uma barragem de rejeitos alteada a montante
- ✓ Executar uma análise computacional do comportamento de uma estrutura pré-dimensionada mediante estudos de tensão-deformação e equilíbrio limite de uma seção da estrutura.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 MARCOS REGULATÓRIOS

A última década foi marcada por eventos catastróficos relacionados ao rompimento de barragens de mineração no estado de Minas Gerais, que trouxeram à tona fragilidades significativas nos processos de gestão de risco e segurança dessas estruturas. Os casos mais emblemáticos foram os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019). Ambos os desastres resultaram em graves perdas humanas, ambientais e econômicas, provocando forte comoção nacional e internacional, e evidenciaram a necessidade urgente de reformulação da legislação e de aprimoramento das práticas de segurança.

Diante da magnitude desses acidentes, o governo federal adotou uma série de medidas regulatórias emergenciais com o objetivo de reduzir os riscos de novos rompimentos e garantir maior segurança às barragens de mineração em todo o território nacional. Nesse contexto, a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução nº 4, em fevereiro de 2019, estabelecendo exigências técnicas e operacionais mais rígidas para a gestão de barragens. Essa resolução foi revogada pela Resolução ANM nº 13, também de 2019, a qual consolidou critérios de segurança e estabilidade estrutural de forma mais detalhada.

Posteriormente, ambas foram substituídas pela Resolução ANM nº 95, de 2022, que se tornou o principal marco regulatório vigente para segurança de barragens de mineração no Brasil. Essa resolução estabeleceu medidas cautelares de abrangência nacional, incluindo a proibição definitiva da construção de barragens pelo método de alteamento à montante — considerado o mais crítico e vulnerável dentre os tipos construtivos — e a obrigatoriedade de descaracterização e reforço das estruturas já existentes construídas por essa técnica.

A evolução normativa seguiu com a publicação da Resolução ANM nº 130/2023, que trouxe atualizações relevantes aos critérios de elaboração, atualização e implementação dos Planos de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), fortalecendo a capacidade de resposta e a articulação com órgãos de defesa civil e comunidades potencialmente afetadas. Essa normativa busca assegurar maior efetividade nas ações preventivas e corretivas em situações de risco iminente, além de ampliar a transparência e a participação social nos processos de gestão de segurança.

Mais recentemente, foi editada a Resolução ANM nº 175/2024, que aprofunda os requisitos técnicos para os projetos de descaracterização e reforço de barragens alteadas a montante, incorporando critérios geotécnicos mais rígidos, controle tecnológico nas etapas

construtivas e maior detalhamento na análise de estabilidade de longo prazo. Essa resolução também reforça a necessidade de monitoramento contínuo e auditorias técnicas independentes, como instrumentos de verificação e rastreabilidade das condições de segurança estrutural.

Paralelamente, o arcabouço jurídico que trata da segurança de barragens foi também reformulado por meio da atualização da Lei Federal nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa legislação foi alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020, a qual introduziu diretrizes mais rígidas e detalhadas sobre responsabilidade técnica, classificação de risco, planos de segurança, planos de ação de emergência (PAE) e penalidades mais severas para o descumprimento das normas.

As mudanças promovidas após os rompimentos refletem não apenas a necessidade de maior controle e fiscalização por parte dos órgãos competentes, mas também a exigência de um novo paradigma no setor mineral, em que a segurança operacional e a gestão de riscos passem a ocupar um papel central na tomada de decisões. Tais avanços legais representam um marco importante na busca por uma mineração mais segura, sustentável e socialmente responsável.

4.2 PROPOSTAS PARA REFORÇO DE BARRAGEM

4.2.1 Reforço de barragem com aterro compactado

O reforço de barragens com aterro compactado é uma técnica amplamente utilizada na engenharia geotécnica com o objetivo de aumentar a estabilidade da estrutura, como pode ser vista na Figura 2, que apresenta a fase final das obras de reforço da Barragem Santana em Itabira/MG de propriedade da VALE. Tal técnica trata-se de uma intervenção que consiste na adição de solo ou material granular compactado junto ao paramento jusante da estrutura, de forma a proporcionar ganho de massa, alteração da geometria e, conseqüentemente, melhora nos fatores de segurança. A Figura 3 apresenta uma seção esquemática ilustrando a Barragem 7 em Jeceaba/MG, também de propriedade da VALE, com a construção de um aterro de reforço a jusante.



Figura 2– Obras de reforço da Barragem Santana, em Itabira/MG.

Fonte: Conexão Mineral, 2023.



Figura 3– Ilustração da obra de reforço da Barragem 7, em Jeceaba/MG.

Fonte: VALE, 2023.

O processo de execução do aterro de reforço envolve extração do material em jazidas, a preparação da superfície de contato, geralmente mediante escarificação e limpeza, seguida pela aplicação de camadas sucessivas de material, com espessura previamente definida, compactadas mecanicamente até atingirem os níveis de densidade especificados em projeto. A compactação tem papel fundamental na redução da permeabilidade e no aumento da resistência

ao cisalhamento do aterro, evitando assim a formação de zonas de fraqueza dentro do corpo da barragem.

O reforço por aterro compactado pode ser eficaz em estruturas alteadas a montante, pois o acréscimo de massa e a nova geometria podem minimizar os efeitos do carregamento estático e dinâmico, além de melhorar a resposta do maciço frente a eventos sísmicos ou condições não drenadas. Por outro lado, o método apresenta limitações, como o grande volume de material necessário, a necessidade de área disponível para execução e o risco de sobrecarga da fundação existente. Além disso, em locais com solo de baixa resistência ou presença de rejeito saturado, a técnica pode exigir soluções complementares, como geossintéticos, drenos verticais ou reforço com materiais cimentícios.

4.2.2 Reforço de barragem com estacas metálicas

Visando a adoção de reforços com estruturas esbeltas, como as cortinas formadas por estacas metálicas, tem se mostrado uma alternativa tecnicamente viável para projetos que demandam soluções rápidas e eficientes. Essas estruturas, tradicionalmente empregadas em obras de escavação, estabilização de margens, aterros e infraestrutura portuária, passam a ser exploradas em aplicações inovadoras, como reforço de barragens de rejeito.

Dentre os principais desafios, destaca-se o risco de instabilização das barragens durante a execução das obras, sendo a própria instalação das estacas um possível gatilho de mecanismos como a liquefação. A celeridade na execução é fundamental, pois prazos reduzidos minimizam a exposição ao risco das comunidades potencialmente afetadas.

As estacas metálicas oferecem vantagens significativas nesse cenário, como rapidez de instalação, menor área ocupada por canteiros e possibilidade de implantação na própria estrutura, especialmente com métodos de baixa vibração, como o sistema press-in. Destacam-se também a flexibilidade construtiva, a facilidade de corte e emenda, o rigoroso controle de qualidade e a disponibilidade regional de perfis metálicos, especialmente em Minas Gerais, reduzindo custos logísticos.

Estas estruturas, sujeitas a esforços de flexão devido à sua esbelteza, são aplicadas tanto em contenções permanentes quanto temporárias. Segundo Gerscovich, Danziger e Saramago (2016), sua difusão no Brasil ocorreu a partir da década de 1970, com a intensificação de obras subterrâneas e metroviárias. Diversas soluções construtivas são utilizadas, incluindo perfis de madeira, concreto armado, perfis metálicos isolados ou justapostos e sistemas mistos.

Os perfis metálicos utilizados em contenções apresentam seções U, Z, H ou tubulares, conectadas por meio de encaixes longitudinais, permitindo a formação de painéis contínuos. As

estacas tubulares, instaladas justapostas, oferecem vantagens estruturais e construtivas, podendo inclusive ter sua rigidez aumentada com preenchimento em concreto.

As estruturas de proteção para contenção ou barramentos, são comumente construídas com perfis de estaca pranchas em aço laminado com seções planas em forma de U, Z ou H mostradas na Figura 4.



Figura 4– Principais tipos de estacas metálicas.

Fonte: Viel, 2022.

A seleção do perfil adequado depende das características geotécnicas da fundação, das solicitações esperadas e do desempenho estrutural necessário. O módulo plástico da seção, aliado ao limite de escoamento do aço, define sua capacidade resistente. Segundo Cintra (2002), a análise da rigidez relativa solo-estrutura (kh/EI) é essencial para prever o comportamento da cortina sob carregamentos horizontais.

Para maximizar o desempenho técnico-econômico, buscam-se perfis com alto módulo elástico, baixa massa por metro quadrado, elevado momento de inércia, aço com propriedades adequadas e maior largura útil. Conforme Giken (2015), comparações entre perfis U, Z, H e tubulares indicam que as estacas tubulares apresentam os melhores resultados, com ganhos expressivos no módulo e momento de inércia para pequenas variações de massa, evidenciando sua versatilidade, conforme apresentado na Figura 5.

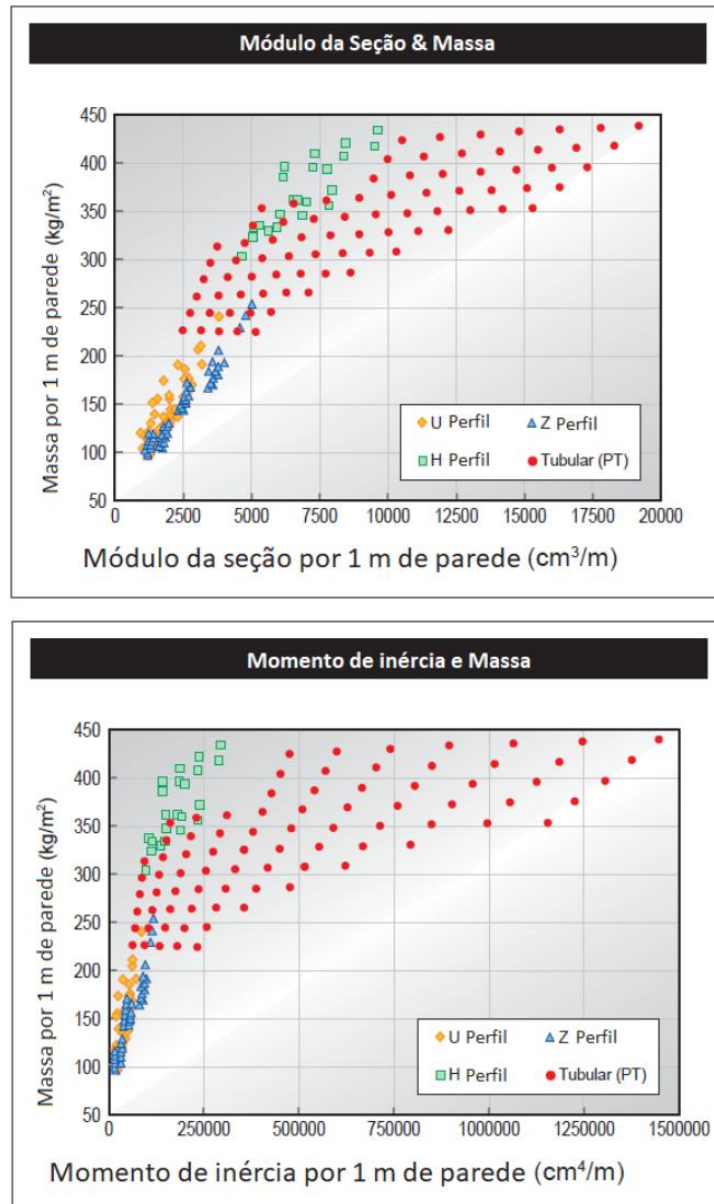


Figura 5– Comparação do desempenho de diferentes perfis de estacas metálicas.

Fonte: Viel, 2022.

Conforme Mello (1979), estacas tubulares apresentam alta capacidade portante e maior rigidez à flexão, torção e flambagem, podendo ser fabricadas em diferentes espessuras e diâmetros. A rigidez relativa entre estrutura e maciço influencia diretamente na distribuição dos esforços e nos deslocamentos ao longo da cortina.

4.2.2.1 Estruturas de Contenção a Jusante utilizando a metodologia Press In

Devido a inexistência de estudos para reforço de barragens com a metodologia Press In, esse capítulo abordara o trabalho desenvolvido por Viel (2022), na qual apresenta o uso do Press In para execução de uma Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ) a partir das estimativa

dos esforços resultantes do potencial ruptura da barragem obtidas pela modelagem tridimensional realizada no FLOW-3D®.

A metodologia de dimensionamento proposta por Viel (2022) tem como objetivo realizar uma verificação detalhada dos diversos fatores que são relevantes para a segurança de estruturas de contenção deste tipo. Dos quais deve-se ter atenção especial ao cálculo das pressões de impacto, às condições e à resposta do terreno de fundação diante dos esforços nas estacas e à resistência do elemento das estacas. Além disso, é importante lembrar que caso ocorra a ruptura da barragem a montante, a estrutura de contenção se portará como um barramento de rejeito, devendo também cumprir critérios de segurança que garantam sua integridade.

Segundo Viel (2022), os cálculos dos comprimentos de embutimento pela formulação do IPA e pelo método de Blum apresentaram resultados muito próximos, validando aplicação de ambas as metodologias.

A Figura 6 apresenta a seção modelada, em especial para o estágio de aplicação das pressões de impacto verificadas no tempo 4,57 s, conforme simulação simplificada no software FLOW-3D®, considerando a mobilização de um material que simula um rejeito com 24 kN/m^3 de peso específico que irá colidir contra uma barreira vertical.

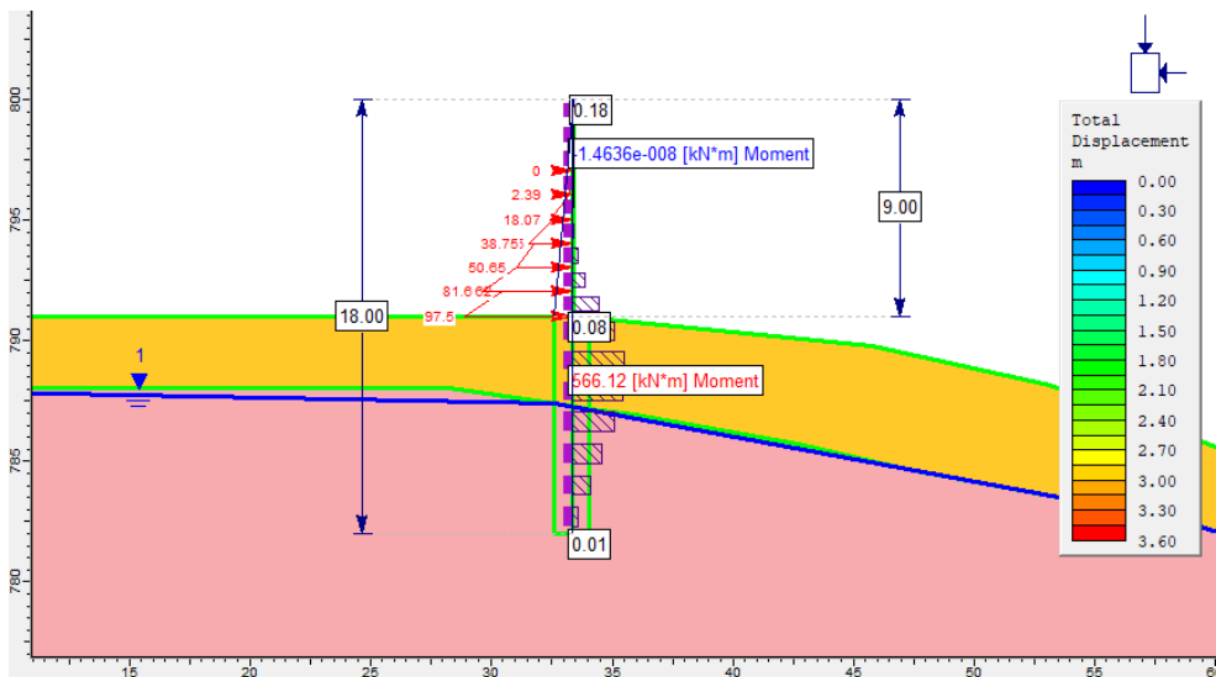


Figura 6– Modelo computacional representando o deslocamento verificado no estágio 5 no tempo 4,57 s

Fonte: Viel, 2022.

4.3 MÉTODOS PARA CRAVAÇÃO DAS ESTACAS METÁLICAS

A cravação de estacas metálicas pode ser realizada por meio de diferentes métodos, tais como percussão, vibração ou prensagem estática — este último conhecido como método *press-in*. As técnicas mencionadas serão abordadas nos tópicos subsequentes, com ênfase na prensagem estática, por se tratar do método adotado no presente estudo.

4.3.1 Cravação por percussão

A cravação por percussão é tradicionalmente o método mais empregado na instalação de estacas (Velloso e Lopes, 2010). Este processo é realizado por meio de um bate-estacas, equipamento geralmente composto por uma torre instalada sobre uma plataforma, onde cabos de aço acionados por um guincho mecânico elevam o martelo responsável pela aplicação da energia de cravação. A introdução da estaca no solo ocorre através de sucessivos impactos do martelo sobre a cabeça da estaca, previamente protegida por um capacete ou anel amortecedor, até que esta atinja a cota de apoio projetada.

Segundo FERREIRA (2015), a cravação por impacto pode ser conduzida utilizando diferentes tipos de martelos, que variam quanto ao princípio de funcionamento, configuração construtiva e energia transmitida. Entre os modelos mais empregados, destacam-se os martelos de queda livre, os martelos a diesel, os pneumáticos e os hidráulicos.

Esse método baseia-se na transferência de energia mecânica para a estaca, promovendo a deformação permanente do solo ao seu redor, possibilitando a penetração do elemento estrutural. No entanto, apresenta como desvantagens a geração de elevados níveis de vibração e ruído, sendo o mais agressivo, neste aspecto, dentre os métodos usuais de cravação. A Figura 7 apresenta um estaca pré-moldada de concreto sendo cravada com um equipamento de percussão “bate estaca”.

A execução desse tipo de solução demanda a limpeza e regularização da área de implantação da cortina de estacas, garantindo o acesso e a estabilidade do equipamento de cravação, além do posicionamento adequado do guincho de operação.



Figura 7– Cravação de estaca metálica com bate estaca.

Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Cravação por vibração

Segundo DECKNER (2013), a cravação por vibração consiste na introdução da estaca no solo mediante a aplicação de vibrações verticais, geralmente geradas por martelos vibratórios. Esse processo visa a redução da resistência do solo, permitindo a penetração da estaca, predominantemente sob seu próprio peso.

Os martelos vibratórios convencionais são compostos por quatro sistemas principais:

- (i) Sistema gerador de vibração (oscilador), que contém pares de massas excêntricas rotativas responsáveis pela produção de forças dinâmicas de natureza sinusoidal;
- (ii) Sistema de transmissão de energia, responsável pela condução da energia do gerador ao oscilador por meio de mangueiras hidráulicas e cabos elétricos;
- (iii) Sistema de geração de energia, que pode ser constituído por grupos geradores a diesel ou sistemas elétricos integrados, controlados por um painel de comando.
- (iv) Sistema hidráulico de fixação, responsável pela ligação entre a estaca e o oscilador.

O tempo de execução da cravação por vibração pode representar cerca de 10% do tempo necessário para a cravação por percussão, demonstrando significativa eficiência operacional. Esse método é comumente empregado em solos granulares, onde a vibração promove

expressiva redução na resistência do solo, e também em solos coesivos, nos quais se recomenda a aplicação de vibrações de baixa frequência para melhor desempenho. Em determinados casos, particularmente em solos argilosos ou altamente coesivos, pode ser necessária a adoção de métodos híbridos, combinando a vibração com a percussão, para viabilizar a penetração das estacas (Rausche, 2002).

Embora apresente menores níveis de ruído em comparação à percussão, o método vibratório pode induzir vibrações mais intensas, o que limita sua aplicação em áreas sensíveis. Os dois principais modelos de martelos vibratórios são: os suspensos por guindaste e os acoplados a braços hidráulicos de escavadeiras (Figura 8), sendo que o próprio peso do conjunto contribui para a cravação (Ferreira, 2015).



Figura 8– Cravação de estaca metálica com martelo vibratório.

Fonte: Autor, 2023.

Tal como nas demais técnicas dinâmicas, a implantação das estacas por vibração exige a limpeza e regularização da área de trabalho, garantindo a estabilidade e o acesso adequado dos equipamentos de cravação.

4.3.3 Cravação por prensagem estática – *Press In*

O método *Press-in* consiste na cravação de estacas metálicas por meio da aplicação de carga estática, utilizando macacos hidráulicos acoplados ao equipamento de instalação. Esses macacos exercem pressão direta sobre a estaca, promovendo sua penetração no solo sem a necessidade de impacto ou vibração. Em comparação com as demais técnicas convencionais de cravação, como a percussiva e a vibratória, o método *Press-in* destaca-se por proporcionar menor emissão de ruídos e vibrações, além de possibilitar maior controle executivo. Ademais, por operar de forma similar a um ensaio de prova de carga estática, esse método também permite estimar a capacidade de carga da estaca durante o processo de instalação (Tehrani *et al*, 2016).

A concepção do sistema baseia-se na utilização da resistência à tração das estacas previamente instaladas, que atuam como estacas de reação, possibilitando a cravação estática das estacas subsequentes, conforme ilustrado na Figura 9. Segundo o manual do IPA (2019), esse processo é aplicável para estacas tubulares metálicas com diâmetros variando entre 500 mm e 2.500 mm. O detalhamento do processo executivo do método será apresentado nos tópicos a seguir.

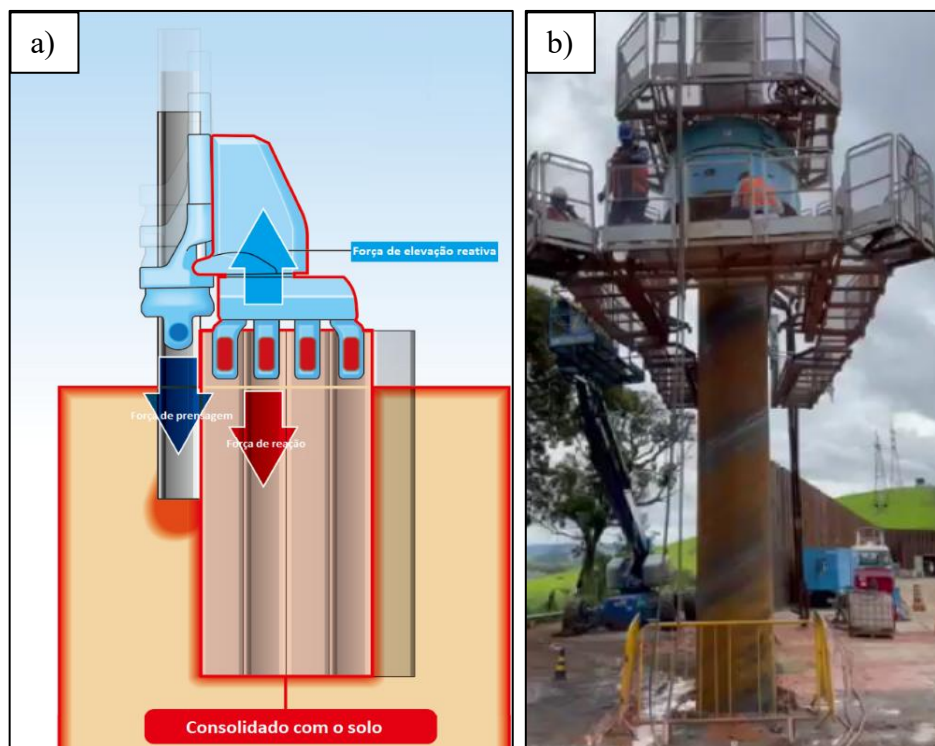


Figura 9– Cravação de estaca metálica com a metodologia *Press In*: a) Princípio do método de instalação *Press in*; b) Cravação de estaca metálica por *Press in*

Fonte: a) Modificado de Giken, 2025; b) Autor, 2023.

4.3.3.1 Sistema de jato de água - *Fitting*

Assim como em qualquer intervenção geotécnica, o conhecimento detalhado das condições do subsolo é essencial tanto para o dimensionamento adequado da estrutura quanto

para a definição do método de cravação e dos equipamentos auxiliares necessários à sua execução.

De acordo com o IPA (2019), a caracterização geotécnica da fundação, incluindo parâmetros como o Índice de Resistência à Penetração do Solo (N_{SPT}), os resultados de ensaios de compressão uniaxial de amostras de rocha, a distribuição granulométrica dos solos, o nível freático e os contatos litológicos, constitui-se em fator determinante não apenas para a viabilidade da obra, mas também para a escolha da técnica de cravação a ser adotada. Tais informações são particularmente relevantes para a validação da aplicabilidade do método de prensagem estática (*press-in*).

O perfil de solo mais favorável à aplicação do método *press-in* é aquele constituído por camadas homogêneas com resistência entre baixa e média. No entanto, em solos mais densificados, como areias compactadas ou depósitos arenosos com presença de cascalho, nos quais o N_{SPT} exceda o valor de 25, torna-se necessária a utilização de sistemas auxiliares para viabilizar a cravação, como o sistema de jato de água (IPA, 2019). Este recurso pode ser eficaz inclusive em solos com valores de N_{SPT} de até 50, desde que limitados a materiais predominantemente arenosos.

A Figura 10 ilustra a aplicação do sistema de jato de água acoplado à extremidade de uma estaca, evidenciando sua funcionalidade no auxílio ao processo de cravação em solos mais resistentes.

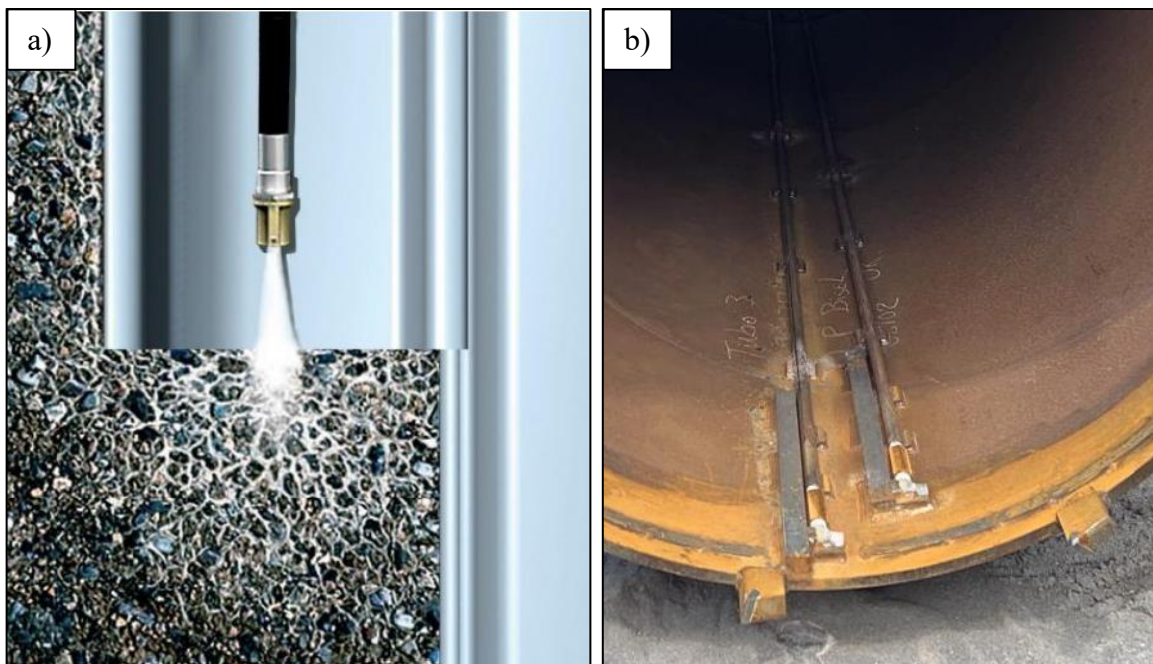


Figura 10– Sistema de lubrificação através de jato d’água - *Fitting*: a) Esquema de funcionamento do *Fitting*; b) *Fitting* implantado em uma estaca tubular.

Fonte: a) IPA, 2019; b) Autor, 2024.

Para materiais arenosos com N_{SPT} acima de 50 deve ser adotada a o sistema de pressão rotativa conhecido como Gyropress, a ser apresentada no tópico a seguir.

4.3.3.2 Sistema de pressão rotativa - *Gyropress*

Em determinadas condições geotécnicas, a utilização do método de prensagem baseado unicamente na reação das estacas previamente cravadas pode não ser suficiente para permitir a penetração de novas estacas no terreno. Para tais situações, foi desenvolvido o sistema de prensagem com rotação assistida, denominado Gyropress, pelas empresas Nippon Steel & Sumitomo Metal e Giken Ltd. (Hirata, 2016).

Esse método inovador permite a instalação de estacas metálicas tubulares com diâmetros variando entre 0,50 m e 1,50 m, sendo necessário o uso de perfuratrizes específicas para cada faixa de diâmetro. Originalmente, a técnica foi concebida para reforço ou reabilitação de fundações e para construção de obras de contenção em margens de rios, rodovias e outras infraestruturas urbanas que se encontram em processo de degradação, sobretudo em áreas densamente ocupadas, onde há limitações significativas de espaço, interferência com estruturas existentes e a exigência de baixos níveis de ruído e vibração (Hirata, 2016).

Nesse cenário, o sistema *Gyropress* apresenta-se como uma solução eficiente para a instalação de estacas em terrenos com elevada resistência à penetração ou em presença de obstáculos, como matacões ou estruturas de concreto remanescentes. De acordo com Hirata (2016), o processo consiste na inserção das estacas por meio da aplicação simultânea de força axial e torque rotacional.

A extremidade inferior das estacas é equipada com brocas metálicas soldadas (coroas), dotadas de elementos cortantes (*bits*) e sistema de jateamento de água (*fitting*), o qual tem a função de refrigerar a ponteira, facilitar a desagregação do solo e reduzir a demanda de força aplicada pela perfuratriz, além de diminuir o tempo de instalação. A Figura 11 apresenta uma estaca metálica tubular com coroa contendo 9 bits e sistema de *fittings* diametrais.



Figura 11– Estacas tubular com brocas metálicas soldadas (coroas), dotadas de elementos cortantes (*bits*) e sistema de jateamento de água (*fitting*).

Fonte: Autor, 2024.

Portanto, o método Gyropress constitui uma evolução do sistema tradicional de prensagem estática, ao combinar o esforço de cravação axial com o movimento rotacional da estaca, viabilizando sua instalação em solos e rochas mais resistentes por meio da escavação ativa promovida pelo conjunto cortante.

4.3.3.3 Base de reação

Para viabilizar o início do processo de cravação por prensagem, é imprescindível a instalação de uma sequência inicial de estacas-prancha, independentemente do tipo de perfil a ser utilizado na contenção (como estacas tubulares ou outros modelos). Essas estacas iniciais têm a função primordial de fornecer a força de reação necessária para que o equipamento execute a cravação das estacas subsequentes.

Em obras convencionais, essa sequência inicial costuma ser executada por meio de métodos tradicionais de cravação, como percussão ou vibração. No entanto, em intervenções realizadas nas proximidades de barragens de rejeito, onde a geração de vibrações deve ser minimizada para preservar a segurança da estrutura e das áreas adjacentes, recomenda-se uma alternativa mais adequada, como a utilização de contrapesos.

A Figura 12 ilustra um modelo de execução da sequência inicial de cravação pelo método de prensagem com apoio em contrapesos acoplados a um suporte fixado à própria máquina de

cravação (Figura 13). A profundidade de cravação das estacas iniciais está diretamente relacionada à força de reação que pode ser mobilizada pelo conjunto de contrapesos.

Após a cravação da primeira estaca com o auxílio dos contrapesos, esta passa a integrar o sistema de reação juntamente com os próprios pesos adicionados, contribuindo para a cravação das estacas subsequentes. À medida que novas estacas são instaladas, elas também passam a atuar como elementos de reação, possibilitando, progressivamente, a substituição completa dos contrapesos pelo próprio sistema de estacas cravadas. Dessa forma, garante-se a continuidade do processo de cravação por prensagem com controle eficaz de vibrações e ruídos durante toda a execução da estrutura de contenção.

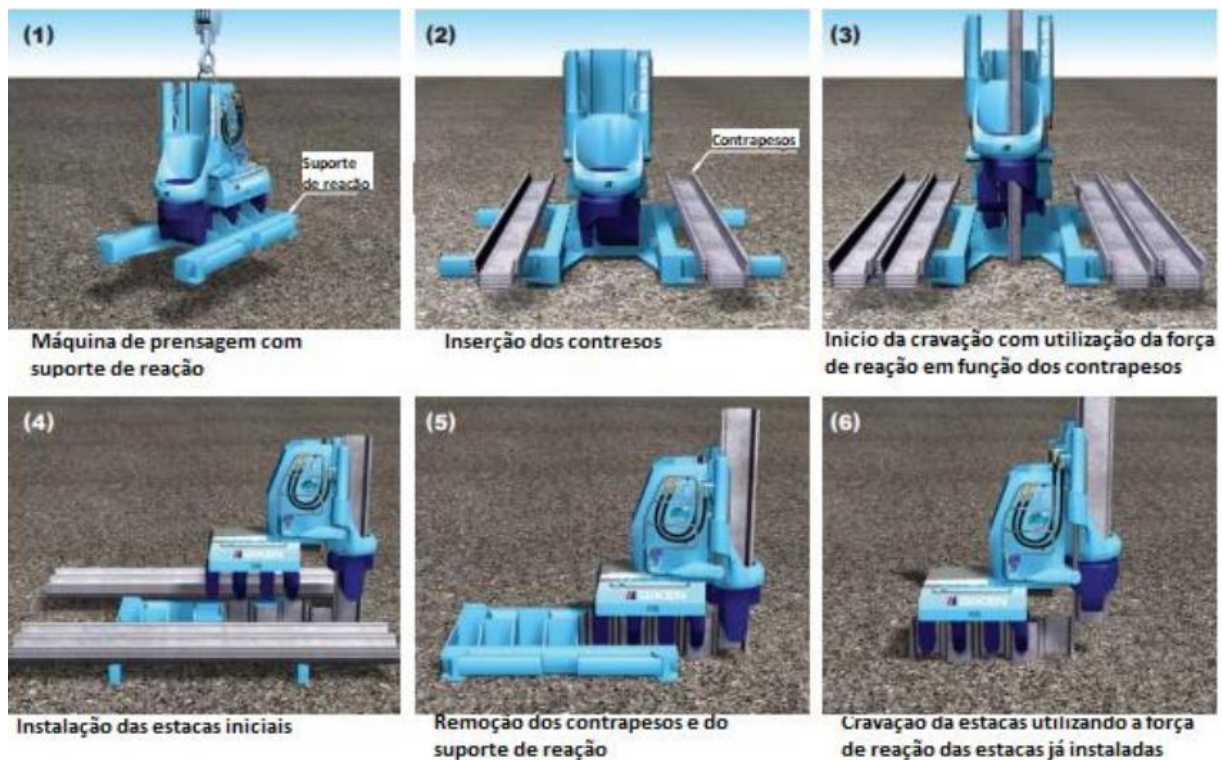


Figura 12– Procedimento inicial de cravação.

Fonte: Viel, 2022.



Figura 13– Equipamento posicionado com os contrapesos de concreto pré-moldado para iniciar o processo de cravação.

Fonte: Autor, 2024.

4.3.3.4 Etapas de Instalação das Estacas com Equipamento *Press-in*

A perfuratriz utilizada no processo de cravação por prensagem estática (*press-in*) opera apoiando-se diretamente nas cabeças das estacas previamente cravadas, as quais funcionam simultaneamente como elemento de reação e suporte para a movimentação longitudinal da máquina ao longo do alinhamento da contenção. Essa característica elimina a necessidade de implantação de aterros ou vias de acesso para deslocamento do equipamento, resultando em significativa redução de custos, otimização do cronograma de execução e melhoria do arranjo físico do canteiro de obras.

A Figura 14 ilustra o procedimento de deslocamento da perfuratriz sobre as estacas já instaladas. O equipamento é dotado de braçadeiras integradas à sua estrutura, que promovem a fixação firme sobre as estacas cravadas, permitindo tanto a mobilização dos esforços de reação quanto a estabilidade necessária durante o processo de cravação. Após a instalação de cada nova estaca, a perfuratriz realiza seu deslocamento horizontal por meio do sistema de mandril — componente responsável pela aplicação simultânea da força de prensagem e, quando necessário, do torque rotacional. Esse sistema permite o soerguimento da máquina e sua transposição para o próximo ponto de cravação, apoiando-se nas estacas adjacentes.

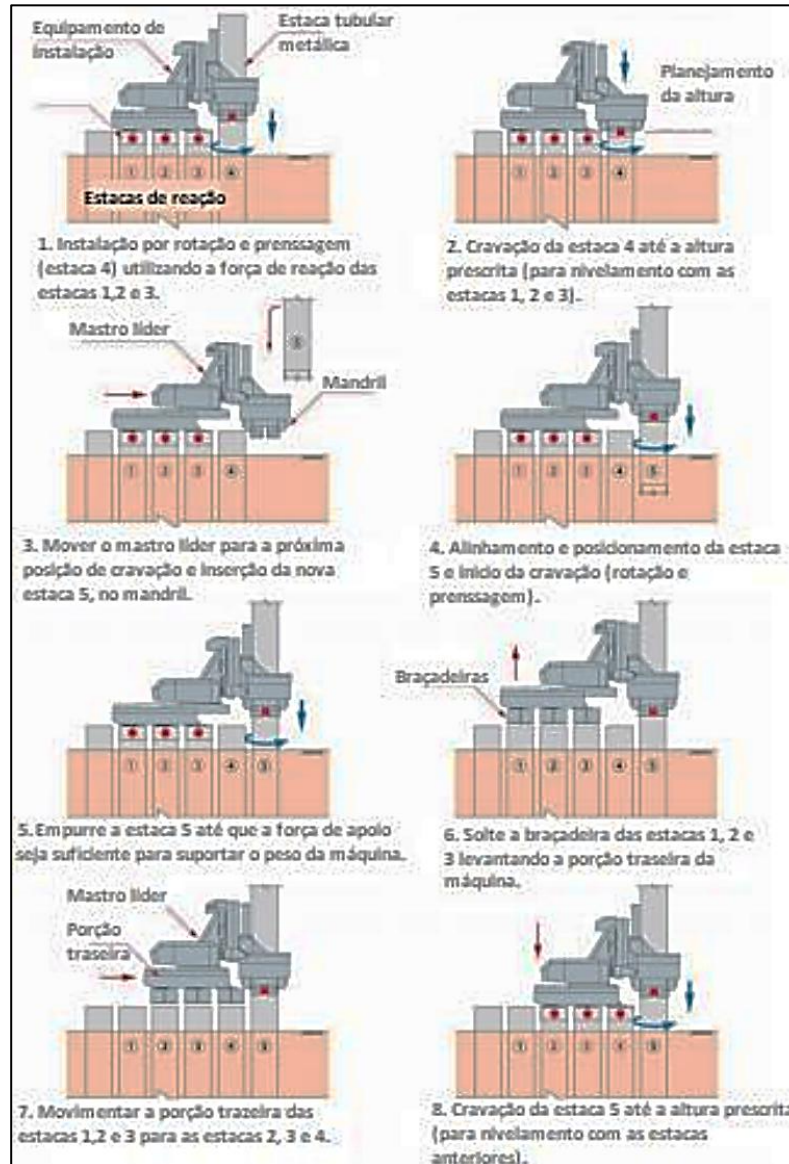


Figura 14– Etapas de Instalação das Estacas com Equipamento *Press-in*.

Fonte: Viel, 2022.

4.3.3.5 Sistema GRB - *Giken Reaction-Based System*

Com o intuito de otimizar a execução das estacas e minimizar a necessidade de intervenções no terreno, como a construção de acessos, a empresa Giken desenvolveu o sistema denominado GRB System (*Giken Reaction-Based System*). De acordo com Giken (2015), esse sistema foi concebido para que todas as etapas do processo de cravação — incluindo o transporte das estacas, seu içamento, posicionamento e a própria cravação — sejam realizadas a partir do topo das estacas já cravadas, eliminando a necessidade de plataformas de trabalho temporárias ou estradas de desvio, mesmo em terrenos instáveis.

O sistema GRB é especialmente indicado para locais com acesso restrito, áreas alagadas, taludes ou condições geotécnicas desfavoráveis. Toda a operação é realizada sobre as estacas

previamente instaladas, incluindo o posicionamento da unidade de energia, como ilustrado na Figura 15.

Após a preparação de um ponto de acesso inicial, onde as primeiras estacas são implantadas, o carregamento das estacas subsequentes é feito diretamente no transportador instalado sobre a plataforma. A partir daí, os elementos estruturais são conduzidos até o ponto de cravação, erguidos por guindaste e posicionados pelo equipamento de prensagem. Este ciclo se repete até a conclusão de toda a contenção, com o avanço progressivo do sistema ao longo do alinhamento da obra.

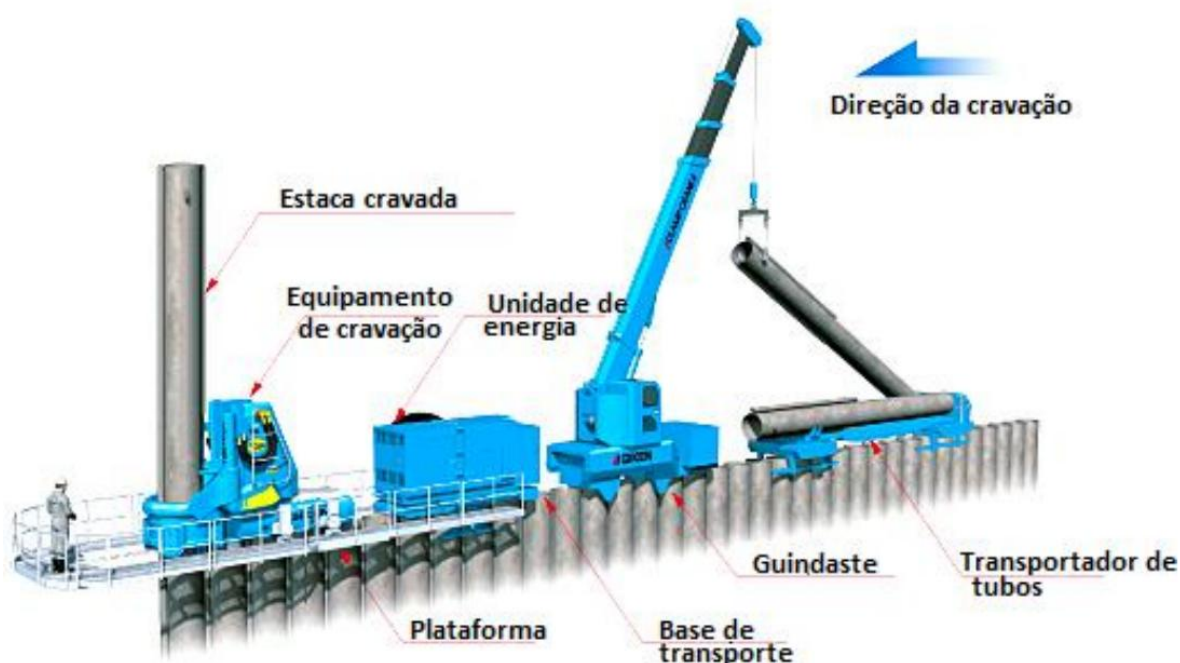


Figura 15– Equipamentos que compõe o sistema GRB.

Fonte: Viel, 2022.

4.3.4 Comparação entre os métodos de cravação

Um dos destaques do método Press-in é a redução no tempo de execução da obra devido a eliminação da necessidade de acesso contínuo de guindastes ao longo de toda a linha de cravação, quando empregado em conjunto com o sistema GRB. Essa característica confere maior flexibilidade logística ao canteiro de obras, permitindo intervenções mesmo em locais de acesso restrito ou com limitações de espaço.

Adicionalmente, o método apresenta vantagens ambientais e operacionais significativas, como a baixa emissão de ruídos e vibrações, aspectos que serão detalhados nos parágrafos subsequentes.

A seguir, apresenta-se uma análise comparativa entre diferentes métodos de instalação aplicáveis a estacas-prancha, com ênfase nos níveis de vibração e ruído gerados durante o processo executivo. O estudo de referência foi conduzido por pesquisadores do Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge (White *et al*, 2002), com o objetivo de avaliar o desempenho acústico e vibracional de distintas metodologias de cravação de estacas.

A pesquisa consistiu na realização de medições de campo durante a instalação de estacas metálicas pelo método de prensagem, em dois locais distintos. As avaliações consideraram parâmetros de ruído ambiental e vibração do solo, obtidos por meio de instrumentos como geofones e sismógrafos. As vibrações foram quantificadas utilizando o parâmetro velocidade de pico de partícula (PPV – *Peak Particle Velocity*), não sendo considerada a frequência das emissões vibratórias. Os resultados foram comparados com os limites recomendados por normativas europeias vigentes à época, além de permitirem uma comparação direta com outras técnicas usuais de instalação de estacas, como a cravação por percussão e por vibração.

Segundo White *et al* (2002), os métodos convencionais de cravação de estacas, embora amplamente utilizados, historicamente enfrentam restrições significativas devido à emissão excessiva de ruídos e vibrações. Tais impactos ambientais e estruturais têm limitado a plena aplicação das estacas metálicas, especialmente em áreas urbanas e sensíveis. Nesse contexto, os autores destacam o método *Press-in* como uma alternativa promissora para a instalação de estacas de aço de grande diâmetro, por operar com níveis praticamente nulos de ruído e vibração, promovendo maior viabilidade em locais com restrições operacionais.

Com relação aos ruídos emitidos, a Figura 16 apresenta os níveis de ruído gerados pelos diferentes métodos de instalação de estacas. Na análise do gráfico, observa-se que o método por prensagem apresenta os menores níveis de emissão sonora quando comparado aos demais. Nota-se ainda que os ruídos gerados pela operação por prensagem situam-se abaixo do limite típico de 70 dB adotado para áreas urbanas, conforme o padrão britânico de controle de ruídos na construção civil, estabelecido pela norma BS 5228 (*British Standards Institution*, 1992).

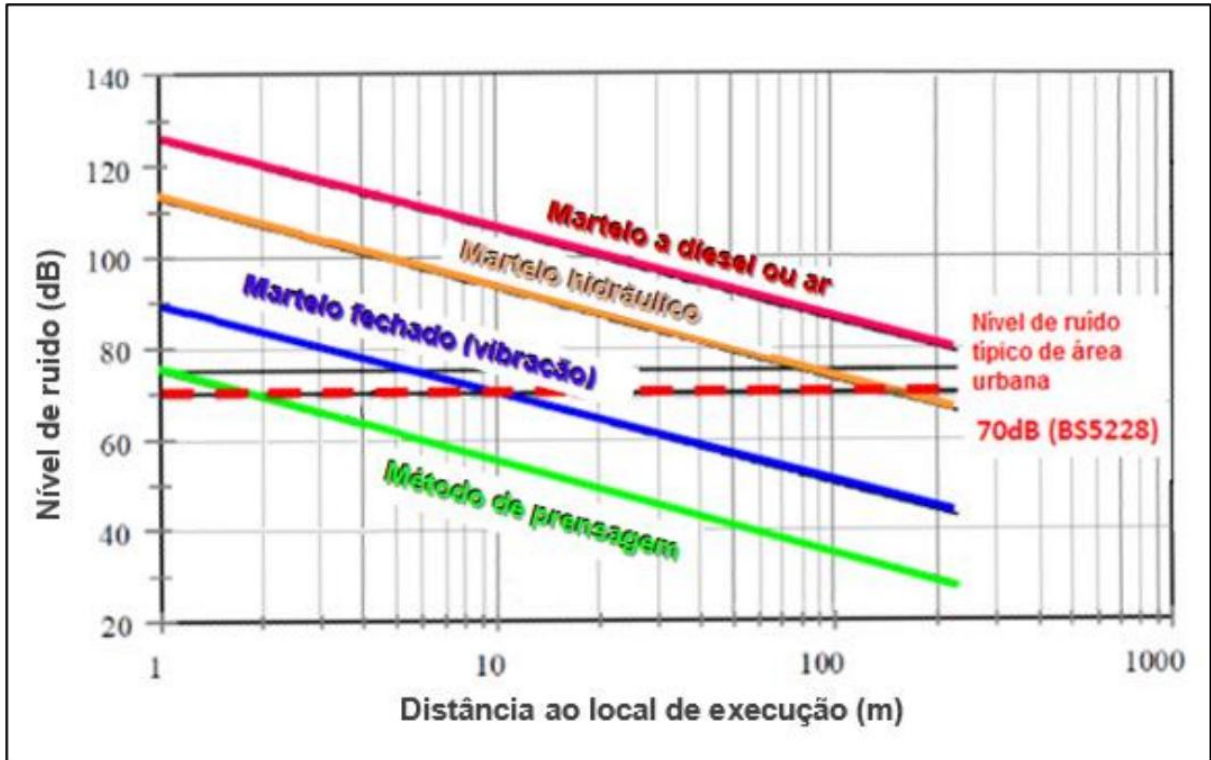


Figura 16– Gráfico comparativo dos níveis de ruídos induzidos pela utilização de diferentes métodos para cravação de estacas.

Fonte: Viel, 2022.

Ao se comparar os níveis de vibração produzidos pelos diferentes métodos de cravação verifica-se, conforme ilustrado na Tabela 1, que o método *Press-in* apresenta os menores valores de velocidade de vibração de partículas (PPV). Essa característica evidencia sua eficácia na redução de impactos vibracionais, o que torna essa técnica especialmente adequada para intervenções em áreas próximas a estruturas sensíveis.

Nas obras associadas ao processo de reforço de barragens, a aplicação do método de prensagem estática pode contribuir significativamente para a segurança estrutural, uma vez que minimiza a transmissão de vibrações ao solo. Nessas situações, é recomendável a instrumentação do entorno com geofones, sismógrafos e piezômetros, a fim de permitir o monitoramento contínuo das vibrações e geração de poropressão durante as atividades de instalação das estacas.

Os níveis máximos de vibração aceitáveis devem ser definidos considerando tanto as condições geotécnicas do local, quanto as características estruturais da barragem em questão. De acordo com Brito (2014), o tipo de solo influencia diretamente a dissipação da energia vibratória: enquanto solos coesivos e argilosos tendem a absorver e atenuar a vibração, solos arenosos favorecem a propagação das ondas vibratórias. Por essa razão, a definição dos limites

vibracionais admissíveis deve ser feita de forma específica para cada obra, com base em estudos preliminares e em conformidade com as condições locais.

Tabela 1 – Velocidades de vibração de partículas gerados pelos diferentes métodos para cravação de estacas

Fonte: Modificado de White *et al*, 2002

Tipo de edificação (limite de vibração – Eurocode 3)	Método de cravação					
	Método Press-in	Martelo de impacto (argila rígida/areia média densa; C = 0,75) (Eurocode 3)		Martelo vibratório (Eurocode 3) kJ/ciclo		
		5 kJ/golpe	25 kJ/golpe	2 kJ/ciclo	10 kJ/ciclo	50 kJ/ciclo
Valor arquitetônico (2 mm/s)	3,5 m	26,5 m	59 m	16 m	36 m	78 m
Área residencial (4 mm/s)	1,75 m	13 m	30 m	8 m	18 m	39 m
Comercial (10 mm/s)	0,7 m	5 m	12 m	3,1 m	7 m	16 m
Industrial (15 mm/s)	0,5 m	3,6 m	8 m	2,1 m	5 m	10 m

4.4 METODOLOGIA IPA PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS

No caso de projeto envolvendo uso de estacas tubulares instaladas pela metodologia de prensagem, recomenda-se a adoção das premissas e critérios consolidados pela International Press-in Association (IPA), no documento Press-in retaining structures: a handbook (IPA, 2019). Este documento consolida mais de quatro décadas de experiência prática no Japão, com aplicação da tecnologia em diversos países, oferecendo uma base técnica robusta para o dimensionamento e execução de obras com essa metodologia. Essa metodologia de estimativa de comprimento de embutimento da estaca, se baseia em uma consideração de rigidez elástica de mola do solo em relação a um carregamento lateral desenvolvido na estrutura.

O manual apresenta um método específico para a estimativa da profundidade de embutimento (ficha) das estacas. Essa metodologia será apresentada e discutida a seguir. Trata-se de um método baseado na simulação de viga com apoio elástico (*subgrade-reaction* – modelo de molas de Winkler) em que o solo é substituído por molas independentes entre si.

Primeiramente, obtém-se o coeficiente de reação horizontal (k_{HO}) inicial da estaca pelo solo, segundo a Equação 1 advinda da Yoshida e Adachi (1970).

$$k_{HO} = \frac{1}{B_{ref}} \alpha E_o \quad \text{Equação 1}$$

Sendo B_{ref} = comprimento da placa de ensaio de coeficiente de empuxo horizontal realizados no Japão, de valor 0,3 m; α = coeficiente de correção do valor do módulo de elasticidade de acordo com o ensaio (Tabela 2); E_o = módulo de elasticidade do solo (kPa);

Tabela 2 – Valores de referência para o coeficiente de correção α do valor do módulo de elasticidade

Fonte: IPA, 2016

Módulo de elasticidade E pelos seguintes procedimentos de teste (kN/m ²)	Valor de α	
	Condições Normais	Com terremoto
(1) Metade do módulo elasticidade obtido das curvas de histerese do teste de carregamento da placa usando um disco rígido com diâmetro de 0,3 m	1	2
(2) Módulo de elasticidade medido no furo	4	8
(3) Módulo de elasticidade obtido a partir de testes de compressão uniaxial ou triaxial em amostras	4	8
(4) Módulo de elasticidade pode ser obtido como 2.800 x N (kN/m ²) onde N é o valor de NSPT.	1	2

Obtém-se o coeficiente de reação horizontal (k_H) da estaca segundo a Equação 2 advinda da pesquisa de Okahara e Takagi (1990).

$$k_H = k_{HO} \left(\frac{B_H}{B_{ref}} \right)^{-3/4} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo B_H = comprimento equivalente do carregamento (compreendido como 10 m pela metodologia da IPA).

Também se avalia o coeficiente de reação horizontal necessário desenvolvido pela pesquisa de Broms e Francis (1968) *apud* Ananthanathan *et al* (2000) para checagem da metodologia, apresentada na Equação 3.

$$k_H = 0,65 * \frac{(E_o)}{(1 - \nu^2)}^{1/2} \sqrt{\frac{E_o * B^4}{E I}} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo B = largura da fundação, ou diâmetro da estaca (m); E = módulo de elasticidade do material da estaca (kPa); I = momento de inércia da sessão da estaca (m^4).

Para obter o comprimento de embutimento da estaca, utiliza-se as Equação 4 a Equação 6.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H B}{4 E I}} \quad \text{Equação 4}$$

$$L_o \geq \frac{3}{\beta} \text{ para estruturas permanentes ou} \quad \text{Equação 5}$$

$$L_o \geq \frac{2,5}{\beta} \text{ para estruturas temporárias}$$

$$I_i = \frac{\pi (R_{ext}^4 - R_{int}^4)}{4} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo L_o = comprimento de embutimento da estaca (m).

Segundo IPA (2019) o modelo proposto é baseado no método de Chang, que considera que a estrutura de apoio se encontra em uma base elástica. Trata-se de uma metodologia de

interação, ou seja, se baseia no desempenho da estrutura. Por isso, limitar o deslocamento máximo permitido para estaca, é um dos critérios definidos.

A força de reação elástica do solo, p , é expressa pela Equação 7.

$$p = k_H * y \quad \text{Equação 7}$$

Sendo: p - força de reação do solo da porção embutida (kN/m^2); K_H - coeficiente de força de reação lateral apresentado pela Equação 1 (kN/m^3); y - deslocamento lateral da porção embutida de estacas tubulares de aço (m)

A tensão induzida nas estacas é, portanto, calculada pela Equação 8 e a Equação 9 apresenta o momento máximo aplicado no paramento.

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_{\max}|}{Z} \quad \text{Equação 8}$$

$$M_{\max} = \frac{P}{2\beta} \sqrt{(1 + 2\beta h_o)^2 + 1} \exp\left(-\frac{\tan^{-1} 1}{1 + 2\beta h_o}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Sendo: σ_{\max} - tensão na parede da estaca (kN/m^2); $|M_{\max}|$ momento de inércia máximo induzido nas paredes da estaca (kNm); Z módulo de resistência à flexão da seção transversal da estaca/comprimento da parede por largura unitária; P - resultante da força lateral por unidade de largura (kN); h_o - altura da superfície do terreno ao local de aplicação da força; β - valor característico das estacas (m^{-1}).

No procedimento simplificado, segundo IPA (2019), as distribuições do deslocamento e do momento de inércia na estaca devem ser calculadas considerando uma redução de espessura da estaca devido à corrosão. É indicada a redução de 1mm na superfície externa das estacas, contudo, o valor adotado para corrosão pode variar de acordo o ambiente em que ela está implantada. Ambientes propensos à corrosão devem ser investigados e avaliados.

Além disso, o deslocamento lateral, δ , e o momento de inércia das estacas, I , são calculados, assumindo que as estacas possuem comprimento elevado. Conforme equações Equação 10 a Equação 13.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad \text{Equação 10}$$

$$\delta_1 = \frac{1 + 2\beta h_o}{2EI\beta^3} P \quad \text{Equação 11}$$

$$\delta_2 = \frac{1 + 2\beta h_o}{2EI\beta^2} PH \quad \text{Equação 12}$$

$$\delta_3 = \frac{H^3}{6EI} (3 - \alpha)\alpha^2 P \quad \text{Equação 13}$$

Sendo: δ - deslocamento no topo da estaca; δ_1 - deslocamento na superfície do terreno; δ_2 - deslocamento devido a deflexão da estaca na superfície do terreno; δ_3 - deslocamento da parede acima da superfície do terreno; β - valor característico das estacas (m^{-1}); h_o altura da

superfície do solo até o local de aplicação da força resultante (m); P - força resultante da pressão lateral por unidade de largura (kN); E - módulo de Young da parede da estaca; I - momento de inércia da estaca (m^4); H - altura da parede da estaca (m); α razão da altura de atuação da atuação da pressão pela altura da parede (h_0/H).

Embora no Brasil os estudos levam em consideração a determinação de Fatores de Segurança (FS) de referência para estudos de estabilidade, neste estudo, em razão do uso do método *Press-in*, utiliza-se os critérios definidos no Japão que priorizam o estado limite de utilização conforme diretrizes da Associação de Estradas do Japão (*Japan road association*, 2009). Logo, o deslocamento horizontal máximo é utilizado como critério de projeto, sendo esse:

- Inferior a 1% da estaca, não podendo ser superior a 300mm no caso de obras normais;
- Inferior a 3% da estaca no caso de obras provisórias;

Com o uso da metodologia acima é possível determinar o comprimento mínimo de embutimento em material competente, variando de acordo com a espessura e diâmetro da estaca.

5 METODOLOGIA

Para o dimensionamento inicial da estrutura de contenção, serão adotados os princípios estabelecidos no manual da *International Press-in Association* (IPA, 2019), conforme descrito no item 4.4. Trata-se de uma abordagem analítica aplicada na definição preliminar das dimensões da estrutura, a qual deverá ser posteriormente validada por meio de análises mais detalhadas, com base em modelos de tensão-deformação.

O comprimento de embutimento das estacas, também denominado “ficha”, será inicialmente estimado a partir dos cálculos analíticos propostos no manual. No entanto, a definição do comprimento efetivamente necessário para garantir a estabilidade da estrutura será determinada com base nos resultados obtidos nas análises numéricas, especialmente a partir da avaliação dos momentos fletores e deslocamentos ao longo da estaca.

Para as análises geotécnicas, será adotado um perfil estratigráfico hipotético, a fim de estimar os esforços atuantes de forma permanente (como os empuxos de terra) e para a definição dos parâmetros do solo a serem utilizados nos modelos computacionais. As condições de contorno utilizadas nas simulações serão detalhadas no capítulo seguinte.

Após a definição preliminar do embutimento, será feita a verificação de uma seção representativa da estrutura, assumindo um cenário não drenado, condizente com a situação de carregamento imediato e mais crítica. Ressalta-se que, embora o estudo esteja focado em uma seção única da barragem, é fundamental considerar possíveis variações ao longo de sua extensão, como alterações no perfil geológico-geotécnico e na geometria do maciço. Nesses casos, diferentes seções deverão ser analisadas, podendo haver a necessidade de variações no comprimento de cravação das estacas ou até mesmo a adoção de múltiplas linhas de estacas, a depender dos esforços atuantes.

Durante o processo de dimensionamento, poderá ser verificado que uma única linha de estacas não seja suficiente para resistir aos esforços gerados pela cunha de ruptura ou pelos deslocamentos induzidos, sendo, portanto, necessária a análise da viabilidade de implantação de linhas adicionais.

As verificações quanto à estabilidade global e ao desempenho estrutural da solução adotada serão realizadas por meio do software RS2, desenvolvido pela empresa Rocscience. Esse programa permite a análise bidimensional de tensões e deformações com base no método dos elementos finitos, sendo amplamente utilizado para simulações envolvendo solos e maciços rochosos. O RS2 possibilitará a avaliação do comportamento da parede de estacas submetida aos esforços resultantes de um possível cenário de ruptura da barragem. Serão observados os

campos de tensões, deslocamentos e o fator de segurança das estacas, de acordo com os estados limites adotados para o projeto.

Adicionalmente, serão conduzidas análises de estabilidade global utilizando o método do equilíbrio limite, com base nos critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 13.028:2024, que trata das diretrizes técnicas aplicáveis a barragens de disposição de rejeitos. Os fatores de segurança exigidos por essa norma deverão ser integralmente atendidos nas simulações realizadas.

Foi elaborado um fluxograma das etapas propostas para o dimensionamento da estrutura, sendo utilizado como referência a metodologia apresentada no manual *Press in* (IPA, 2019). O fluxograma apresentado na Figura 17 indica as etapas desenvolvidas para o dimensionamento estrutura de contenção em estacas metálicas proposta.

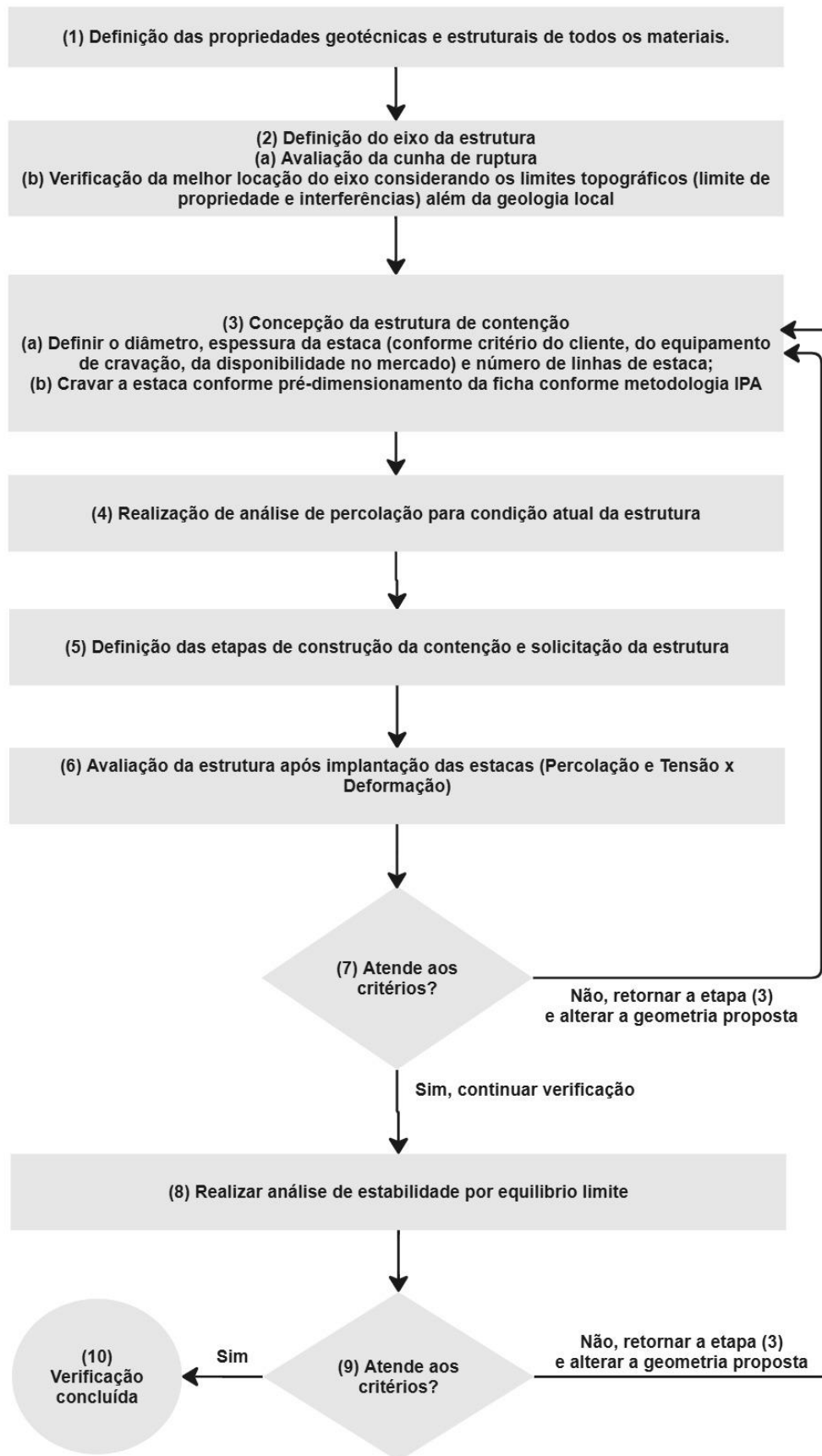


Figura 17– Fluxograma de dimensionamento do reforço com estacas.

5.1 METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM ESTACAS EM UMA BARRAGEM DE REJEITOS

Em um projeto real, essa etapa consistiria na melhor compreensão da estrutura onde será construída o reforço, devendo ser realizada uma campanha de investigações geotécnicas contemplando ensaios de campo e laboratório que auxiliarão na validação dos parâmetros geotécnicos da região de implantação da contenção, definição do perfil estratigráfico do subsolo, identificação do nível de água. Para definição das especificações do sistema de cravação necessário é importante a aferição dos parâmetros de resistência.

Para este estudo, foi proposto um perfil geotécnico de uma barragem fictícia, conforme Figura 18.

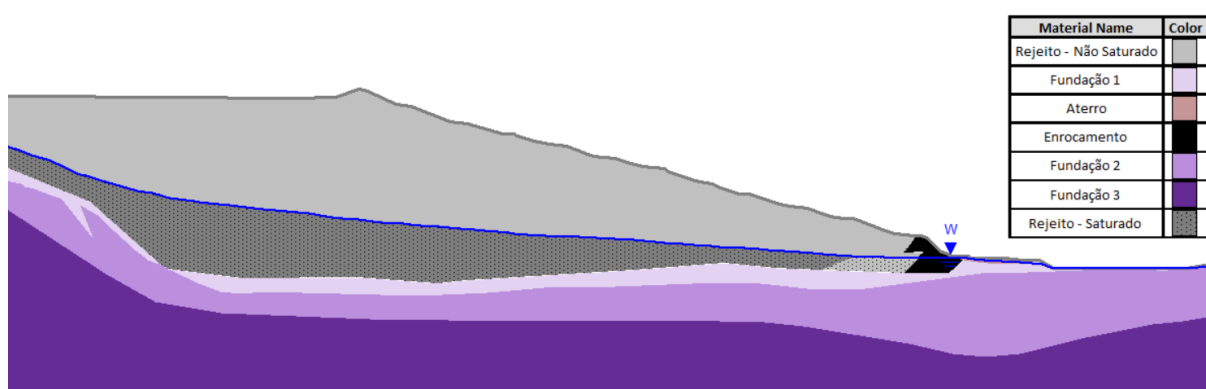


Figura 18– Seção geológica-geotécnica fictícia.

5.1.1 Análise de Percolação

Considerando-se a condição de saturação frequentemente observada do maciço das barragens, torna-se essencial a avaliação do comportamento do fluxo subterrâneo após a instalação de estruturas de reforço, como cortinas de estacas com espaçamento livre entre os elementos. Essa análise visa assegurar que a implantação das estacas não resulte em elevação significativa do nível freático, o que poderia comprometer a estabilidade da estrutura.

Para esse fim, é necessário, em um primeiro momento, compreender o regime de fluxo atual, sem a presença das estacas. A partir dessa verificação, foi possível simular o impacto da introdução das estacas sobre o regime de fluxo em seções onde está prevista a instalação desses elementos.

É importante ressaltar que, mesmo quando a intervenção estrutural está concentrada em setores delimitados da barragem, a análise tridimensional (3D) do fluxo subterrâneo torna-se necessária em fases mais avançadas do projeto. Isso se deve à geometria irregular da estrutura

e à possível concentração de fluxos em zonas de talvegue ou em regiões com variações litológicas significativas.

5.1.1.1 Condições de contorno

As análises de percolação requerem a definição de alguns critérios e configurações específicas para a utilização do software Slide 2, da Rocscience. Essas definições estão elencadas abaixo:

- Número máximo de interações: 500;
- Tolerância: 1E-06;
- Peso específico do fluido (água): 9,81 kN/m³;
- Limite para poropressões negativas: nenhum;
- Tipo de solo: *General*;
- Modelo de condutividade hidráulica: *Simple*.

A definição do modelo numérico foi realizada a partir da aplicação de condições de contorno e da construção da malha de elementos finitos. Em relação às condições de contorno, foram aplicadas condições de carga total nos contornos em contato com o nível d'água, e a condição *unknown* no talude de jusante.

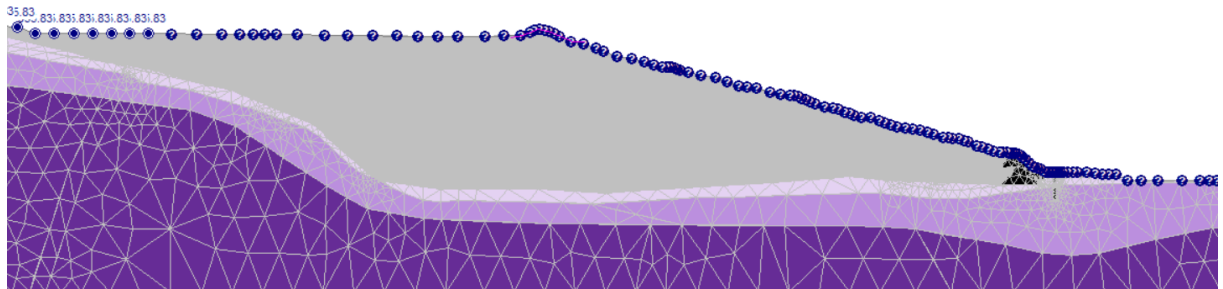


Figura 19– Modelo numérico.

Para representar adequadamente o comportamento do fluxo subterrâneo no cenário com a implantação das estacas de reforço, torna-se necessário considerar a influência que essas estruturas exercem na permeabilidade da região onde são instaladas. Uma vez que as estacas metálicas podem ser consideradas, do ponto de vista hidráulico, como elementos impermeáveis, a percolação passa a ocorrer apenas pelos espaços de solo existentes entre elas.

Essa condição é comumente simulada por meio da redução da permeabilidade da região de cravação, utilizando-se o conceito de permeabilidade equivalente. Tal abordagem permite representar a diminuição da seção hidráulica efetiva para o escoamento, resultando em uma

área útil reduzida para a percolação e, conseqüentemente, possibilitando a análise de seus efeitos sobre o nível freático e os gradientes hidráulicos a jusante da estrutura.

A determinação da permeabilidade equivalente baseia-se na aplicação da Lei de Darcy, adaptada para meios compostos, conforme representado na Equação 14. Essa formulação possibilita quantificar, de maneira simplificada, a nova condutividade hidráulica da zona reforçada, levando em conta a proporção entre o material impermeável (estacas) e o material permeável remanescente (solo).

$$k_{eq} = \frac{1}{C} * [(k_1 * C_1) + (k_2 * C_2) + \dots + (k_n * C_n)] \quad \text{Equação 14}$$

Sendo: k_{eq} : permeabilidade equivalente (m/s); C: comprimento total da linha de estaca (m); K_1, K_3, K_5, \dots : permeabilidade da estaca (m/s) (= 0 m/s); C_1, C_3, C_5, \dots : diâmetro da estaca (nesse estudo 1,20 m); H_2, H_4, H_6, \dots : comprimento de solo entre as estacas (nesse estudo 1,20 m); K_2, K_4, K_6, \dots : permeabilidade do solo (Tabela 3)

Os parâmetros de permeabilidade para os materiais foram premissados e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de permeabilidade e razão de anisotropia dos materiais

LITOLOGIA	K (m/s)	Kv/Kh
Rejeito	7,6E-07	1,0
Aterro	1,0E-05	9,0
Enrocamento	1,0E+00	1,0
Fundação 1	1,0E-04	1,0
Fundação 2	1,0E-03	0,6
Fundação 3	1,9E-06	1,0

Através da Equação 14 obtêm-se a permeabilidade equivalente para as regiões de implantação das estacas.

Tabela 4 – Permeabilidade equivalente para as regiões de implantação das estacas

MATERIAL	K_{eqh} (m/s)
Aterro-Estaca	5,0E-06
Fundação 1-Estaca	2,5E-05
Fundação 2-Estaca	5,0E-04

Cabe ressaltar que os materiais com permeabilidade equivalente serão dispostos na região da linha de estacas, onde termos estacas e solo natural, criando um setor equivalente para cada litologia na análise 2D. Dessa forma, na Figura 20 está ilustrado a permeabilidade equivalente dos materiais.

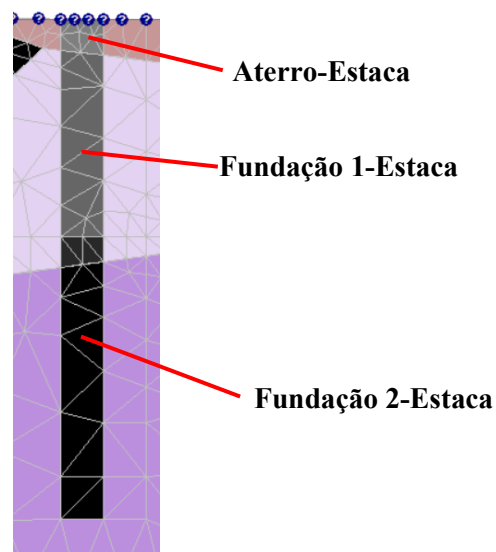


Figura 20– Detalhe da implantação da estaca na análise de percolação.

5.1.1.2 Erosão progressiva

No que concerne os pontos de atenção referentes a implantação de cortina de estacas relacionados à percolação dos materiais, além da alteração da permeabilidade dos materiais *in situ*, por meio da permeabilidade equivalente, é fundamental a análise dos gradientes hidráulicos na região de implantação, especificamente nos espaços entre as estacas e na superfície do terreno próximo às estacas, de forma a avaliar a possibilidade de carreamento de material e erosão interna.

Dessa forma, a partir do modelo calibrado da análise de percolação, foram introduzidas seções de controle nos pontos a montante e a jusante da implantação das estacas, de forma a obter as vazões resultantes, possibilitando o cálculo dos gradientes hidráulicos., considerando a Lei de Darcy para a permeabilidade dos solos, indicada na Equação 15 e Equação 16:

$$v = k \times i \quad \text{Equação 15}$$

$$Q = k \times A \times \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{Equação 16}$$

Sendo: Q representa a vazão da água no meio poroso (em m/s²), k o coeficiente de permeabilidade do solo (m/s), i representa o gradiente hidráulico e A, h e L são as dimensões da seção estudada, sendo elas, respectivamente, a área, carga hidráulica e distância percorrida.

No cálculo dos gradientes hidráulicos realizados, foi considerada a área hidráulica, real espaçamento em solo descontando a estaca no eixo da estaca e a permeabilidade real do solo.

Também, para validação dos gradientes hidráulicos obtidos, considerou-se um fator de segurança contra ruptura hidráulica, conforme Caputo (2015) de no mínimo 4, sendo definida conforme Equação 17 a seguir.

$$FS = \frac{i_{crit}}{i_{m\acute{a}x}} = 4 \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 17}$$

Sendo: i_{crit} , gradiente cr\~{i}tico, que ocorre na camada superior, neste caso no aterro localizado no p\~{e} da estrutura, e calculado conforme Equa\c{c}\~{a}o 18 a seguir.

$$i_{crit} = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w)}{\gamma_w} = \frac{(18 - 10)}{10} = 0,8 \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 18}$$

5.1.2 An\~{a}lise tens\~{a}o x deforma\c{c}\~{a}o

A fim de entender as tens\~{o}es solicitantes e as deforma\c{c}\~{o}es absorvidas ao longo do processo construtivo da solu\c{c}\~{a}o de refor\c{c}\~{o} da funda\c{c}\~{a}o, foram realizadas an\~{a}lises de tens\~{a}o deforma\c{c}\~{a}o pelo m\~{e}todo dos elementos finitos utilizando o software RS2. Para as an\~{a}lises, foi feito o detalhamento das etapas construtivas, no qual foi poss\~{i}vel observar o comportamento da estrutura em meio \~{a}s interven\c{c}\~{o}es realizadas, essas etapas levaram em considera\c{c}\~{a}o as condi\c{c}\~{o}es drenadas e n\~{a}o drenadas para defini\c{c}\~{a}o dos par\~{a}metros geot\~{e}cnicos dos materiais. As an\~{a}lises de tens\~{a}o-deforma\c{c}\~{a}o tamb\~{e}m permitiram a defini\c{c}\~{a}o do comprimento das estacas a serem utilizadas e sua verifica\c{c}\~{a}o quanto a esfor\c{c}\~{os atuantes.

5.1.2.1 Condi\c{c}\~{o}es de contorno

O modelo num\~{e}rico foi definido a partir da aplica\c{c}\~{a}o de condi\c{c}\~{o}es de contorno, carregamentos de campo e constru\c{c}\~{a}o da malha de elementos finitos. Em rela\c{c}\~{a}o \~{a}s condi\c{c}\~{o}es de contorno, foram aplicadas condi\c{c}\~{o}es de restri\c{c}\~{a}o de deslocamentos x e y na funda\c{c}\~{a}o (extremidade inferior) e restri\c{c}\~{a}o de deslocamentos em x nas extremidades laterais da se\c{c}\~{a}o. A malha de elementos finitos foi discretizada utilizando elementos triangulares de 3 n\~{o}s por toda a se\c{c}\~{a}o, discretizando de forma mais detalhada nos locais de maior interesse de an\~{a}lise das deforma\c{c}\~{o}es sofridas, como por exemplo, no p\~{e} da estrutura, onde s\~{a}o cravadas as estacas met\~{a}licas. Por fim, a condi\c{c}\~{a}o de carregamento de campo considerou $k_0=0,5$ tanto para tens\~{o}es verticais quanto horizontais, sendo este um valor representativo para solos segundo Ziccarelli, M. et al. (2024). A Figura 21 mostra as condi\c{c}\~{o}es de contorno e a Figura 22 mostra as configura\c{c}\~{o}es de malha utilizadas nas an\~{a}lises de tens\~{a}o-deforma\c{c}\~{a}o.

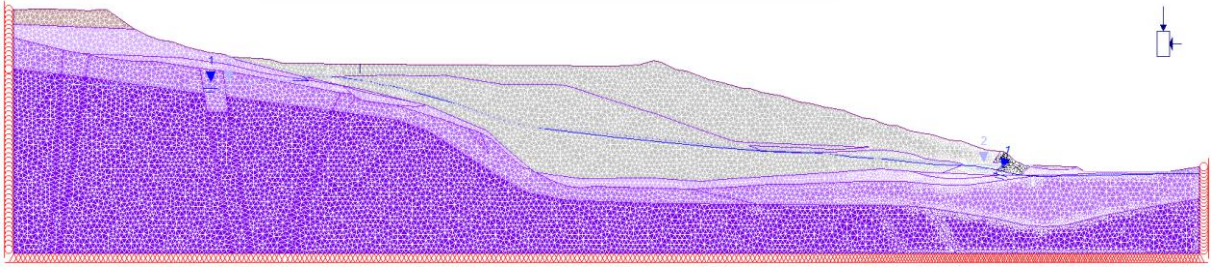


Figura 21– Condições de Contorno

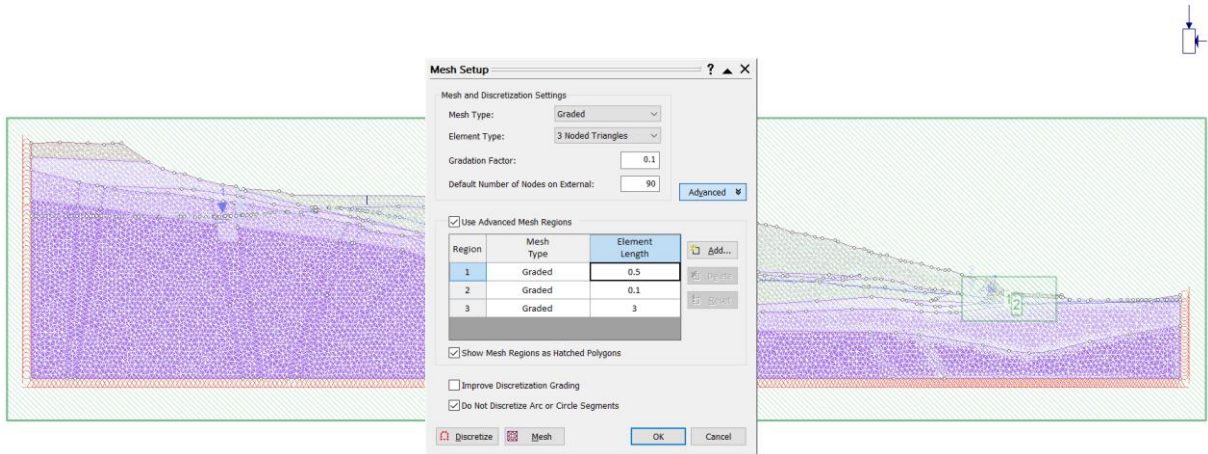


Figura 22– Malha de Elementos Finitos

A estaca foi simulada como um suporte do tipo *liner* sendo adotado o modelo de Timoshenko. Conforme Rocscience (2025), a simulação de viga por Timoshenko, leva em consideração a deformação por cisalhamento transversal e é recomendada se você estiver usando elementos finitos com nós no meio.

Segundo Santos e Futai (2021), para uma estrutura na qual uma das dimensões se estende de forma indefinida em relação às demais, a consideração de um elemento de estacas em Estado Plano de Deformação é plausível. O elemento de viga desenvolvido na metodologia de Timoshenko, conforme apontado no trabalho de Cheng et. al. (1997), correlaciona adequadamente princípios da distribuição de esforços em vigas segundo a mecânica de sólidos deformáveis e comportamento de deslocamentos associado a forças cortantes, com uso de parâmetros geométricos e de deformabilidade da contenção e elementos de contorno do próprio meio de solo.

Dessa forma, as considerações de rigidez são reduzidas para a avaliação de Estado Plano de Deformação, que deverá considerar uma rigidez por metro da estrutura, sendo apresentada na Equação 19 e Equação 20:

$$I_{(CORRIGIDA)} = \frac{I}{D_{ext} + e} \quad \text{Equação 19}$$

$$A_{(CORRIGIDA)} = \frac{A}{D_{ext} + e} \quad \text{Equação 20}$$

Sendo: D_{ext} = diâmetro externo da seção sem correções de corrosão; e = espaçamento entre tubos das seções. I = momento de inércia da seção da estaca (m^4) obtido na Equação 6. A = área efetiva da seção (m^2).

Ressalta-se que os parâmetros mecânicos atribuídos às estacas metálicas, utilizadas no reforço, foram determinados com base nas características geométricas e no material especificado. As estacas foram consideradas como tubos metálicos com diâmetro externo de 1.200 mm e espessura de parede de 21 mm, fabricados em aço de alta resistência conforme especificação ASTM A572 Grau 50, possuindo tensão de escoamento de 345 MPa e módulo de elasticidade de 2,06 GPa.

Para o cálculo da rigidez estrutural dessas estacas, foi também considerada a perda de espessura associada à corrosão ao longo da vida útil projetada. Adotou-se uma espessura de sacrifício de 1,2 mm para cada face do tubo (interna e externa), resultando em uma redução total de 2,4 mm na espessura útil da parede metálica. Esse valor está em conformidade com as recomendações do EUROCODE 3 – Parte 5 (2007), para estruturas em contato com o solo natural e vida útil estimada de 100 anos.

O espaçamento livre entre estacas foi fixado em 1,20 m, e todas essas variáveis foram consideradas na modelagem numérica para a avaliação da rigidez global do sistema de contenção proposto. As propriedades finais adotadas para as estacas, considerando os efeitos da corrosão, considerando a Equação 6, Equação 19 e Equação 20 encontram-se sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros atribuídos às estacas

Estaca	Módulo de Young (Pa)	Área corrigida – Estado Plano (m^2)	Momento de Inércia corrigida – Estado Plano (m^4)
Estaca 1200 mm e 21 mm espessura Espaçamento de 1,20 m (entre estacas)	$2,06 \times 10^{11}$	0,030526385	0,00529482

Os parâmetros de deformabilidade para os materiais foram definidos a partir de valores da literatura e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Módulos de Elasticidade e Poisson dos materiais

MATERIAL	ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA	E [kPa]	E_u [kPa]	ν	ν_u
Rejeito	Mohr-Coulomb	16000		0,20	
Rejeito - Não drenado	Vertical Stress Ratio	-	20000	-	0,495
Fundação 1	Mohr-Coulomb	8785		0,20	

MATERIAL	ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA	E [kPa]	E _u [kPa]	v	v _u
Fundação 1 - Não drenado	Vertical Stress Ratio	-	10981	-	0,495
Fundação 2	Mohr-Coulomb	60000		0,30	
Fundação 3	Mohr-Coulomb	100000		0,30	
Enrocamento	Leps superior	150000		0,30	

5.1.2.2 Interface solo-estrutura de contenção

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico que possui a premissa de obter uma solução contínua para forças e deslocamentos que se desenvolvem no meio, devido à compatibilização de deslocamentos em um nó compartilhado por dois elementos distintos. Todavia, há casos em que a descontinuidade deve ser reproduzida por um elemento numérico que a permita, como é a condição de elementos para interação solo-estrutura.

Para a consideração de um deslizamento entre duas superfícies de materiais em um meio descontínuo pela presença de uma estrutura que os separa, como é o caso para os materiais de fundação e as estacas, é possível criar um elemento de “structural interface” na modelagem na plataforma de Método dos Elementos Finitos. Nesse tipo de elemento, é considerada uma interface imediatamente antes e imediatamente após o elemento estrutural avaliado para a contenção, permitindo assim deslocamentos diferenciais entre estaca e o solo de forma a possibilitar a consideração de ausência de vínculo entre elementos.

Na consideração de uma interface de modelagem, deve-se fazer uso de um coeficiente de redução de resistência (*Rinter*) para subestimar a resistência e deformabilidade no contato do material. Isso permite uma avaliação de deslocamentos concentrados na interface, desconsiderando a típica condição de perfeita união entre nós na modelagem de Método dos Elementos Finitos. Testes com modelagens numéricas mostram que quanto menor o valor da interface, *Rinter*, maior será o momento fletor. Portanto, é importante estimar um valor razoavelmente coerente para esta interface. Esse coeficiente pode ser melhor determinado através de ensaios de cisalhamento direto, realizado com cada tipo de material presente na fundação e uma placa de metal semelhante ao aço da estaca, para que assim seja possível determinar com melhor precisão a relação entre o ângulo de atrito solo-estaca. Como não há esses ensaios, existem alguns valores indicados na literatura, no entanto, tais são um tanto quanto conservadores. Além disso, esse coeficiente de redução é diretamente influenciado pelos níveis de tensão, ou seja, quanto maior o nível de tensão maior será o *Rinter*, uma vez que, o confinamento em questão torna menos provável o deslizamento entre solo-estrutura.

A Tabela 7 apresenta os valores de *Rinter* sugeridos por Brinkgreve e Shen (2011) a depender do tipo de interação solo-estrutura.

Tabela 7 – Valores de referência para o coeficiente de redução *Rinter* (Brinkgreve e Shen 2011).

TIPO DE INTERFACE	<i>Rinter</i>
Areia – Aço	0,6 – 0,7
Argila – Aço	0,5

Considerando que a fundação se trata, em sua maior parte, de um solo com características arenosas, adotou-se o valor de 0,6 para o *Rinter* da interface solo-estaca. Sendo assim, multiplica-se a resistência ao cisalhamento pelo coeficiente de redução de interface (*Rinter*) e se multiplicam os módulos de deformabilidade pelo quadrado do coeficiente de redução, conforme Equação 21 a Equação 23.

$$\phi R = \tan^{-1} (Rinter * \tan \phi') \quad \text{Equação 21}$$

$$E'R = Rinter^2 * E'; \quad \text{Equação 22}$$

$$GR = Rinter^2 * G \quad \text{Equação 23}$$

Sendo, ϕR : Ângulo de atrito reduzido; $E'R$: Módulo de deformabilidade normal reduzido; GR : Módulo de deformabilidade cisalhante reduzido; ϕ' : Ângulo de atrito do solo; E : Módulo de deformabilidade normal e G : Módulo de deformabilidade cisalhante.

Sabendo que o módulo de deformabilidade cisalhante é dado pela Equação 24 e aplicando o coeficiente de redução, tem-se os valores apresentados na Tabela 8 a serem utilizados na modelagem para interface solo-estrutura.

$$G = E / (2*(1 + \nu)) \quad \text{Equação 24}$$

Tabela 8 – Parâmetros interface solo-estrutura.

INTERFACE	ϕ'	ϕR	E' (kPa)	$E'R$ (kPa)	G' (kPa)	$G'R$ (kPa)
Rejeito	26,2	26,2	16,45	16.000,0	5.760,0	6.015,0
Fundação 1	22,0	22	13,63	8.785,0	3.162,6	3.302,6
Fundação 2	41,9	41,9	28,30	60.000,0	21.600,0	22.556,4
Fundação 3	39,7	39,7	26,48	100.000,0	36.000,0	37.594,0
Enrocamento	35,0	35	22,79	150.000,0	54.000,0	56.391,0

5.1.2.3 Estágios de análise

As análises tensão deformação consideraram todos os estágios construtivos do reforço, incluindo a condição atual, para verificar o comportamento da estrutura em cada etapa de implantação dos elementos de reforço. Os estágios considerados foram:

- (i) Condição atual: Atrelada à condição da barragem atual, anterior às intervenções a serem feitas. Este estágio servirá como referência para os estágios seguintes de forma

a determinar as deformações e deslocamentos ocorridos ao longo das obras de reforço. O nível freático/piezométrico considerado nesse cenário admite as leituras normais;

- (ii) Cravação da estaca: Neste estágio, é simulada a cravação da estaca conforme definido em projeto. Assim, é possível verificar as deformações imediatamente após as intervenções. Utilizou-se parâmetros geotécnicos na condição drenada para todos os materiais, conforme concebido para o projeto. Ainda, neste cenário, foi considerado com base na literatura e tipos de materiais envolvidos um valor de interação solo-estrutura de 0,6, para representar a interação entre o aço e o solo da fundação. Quanto ao nível freático/piezométrico, considerou o mesmo cenário de NA normal;
- (iii) Condição não drenada de pico: Este cenário computa a possível atuação dos materiais contráteis na condição de resistência não drenada sob esforços de cisalhamento, considerando a estrutura reforçada com as estacas tubulares. Este estágio é considerado o cenário mais crítico da barragem. Para esse cenário, considerou-se uma contribuição de elevação do nível freático em função da implantação do reforço na estrutura. Essa elevação do nível freático visa representar a mobilização da resistência não drenada dos materiais contráteis.

5.1.2.4 Deslocamento máximo admissível

Embora no Brasil os estudos levam em consideração a determinação de Fatores de Segurança (FS) de referência para estudos de estabilidade, neste estudo, em razão do uso do método *Press-in*, utiliza-se os critérios definidos no Japão que priorizam o estado limite de utilização conforme diretrizes da Associação de Estradas do Japão (*Japan road association*, 2009). Logo, o deslocamento horizontal máximo é utilizado como critério de projeto, sendo esse:

- Inferior a 1% da estaca, não podendo ser superior a 300mm no caso de obras normais;
- Inferior a 3% da estaca no caso de obras provisórias;

Devido a obra de reforço ser uma obra definitiva, será considerado o deslocamento inferior a 1% da estaca, não podendo ser superior a 300mm.

5.1.2.5 Momento máximo admissível

Considerando, então, as orientações constantes no manual da IPA, as análises das estacas tubulares a serem adotadas no presente estudo levarão em consideração a Equação 25 para definição da tensão máxima admissível.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} \quad \text{Equação 25}$$

Sendo M_{max} o momento máximo que ocorre na estaca(kNm) e Z o momento resistente de área(m³).

Importante ressaltar que a IPA recomenda que a σ_{max} seja menor que a tensão admissível do aço (345 MPa para aço ASTM A572 Grau 50), dessa forma, usar-se-á um fator de segurança de 1,50 sobre o limite de escoamento

A Equação 26 e Equação 27 apresentam os cálculos desenvolvidos para aferir o momento resistente de área, sendo que há uma correção para o momento resistente por metro, dividindo o mesmo pelo diâmetro do tubo somado ao espaçamento entre os mesmos.

$$Z_i = \frac{\pi (R_{ext}^4 - R_{int}^4)}{4 * R_{ext}} \quad \text{Equação 26}$$

$$Z = \frac{Z_i}{D_{ext} + e} \quad \text{Equação 27}$$

A Tabela 9 apresenta o momento fletor admissível para a estaca alvo de estudo.

Tabela 9 – Momento Fletor Admissível

Estaca	Momento Fletor Admissível (kN.m)
Estaca 1200 mm e 21 mm espessura Espaçamento de 1,20 m (entre estacas)	2.030,00

5.1.2.6 Força cisalhante máxima admissível

Para a máxima força de cisalhamento desenvolvida na estaca, referente ao Estado Plano de Deformação, será utilizado a consideração do critério de falha Tresca *apud* Beer (2011) em que, na direção do esforço cortante, a tensão de cisalhamento desenvolvida é igual à metade da tensão normal máxima. A Equação 28 e Equação 29 expressam as equações avaliadas.

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_{max}}{2} \quad \text{Equação 28}$$

$$F_{máx} = \tau_{xy} * A \quad \text{Equação 29}$$

Sendo σ_{max} = tensão de escoamento adotada para o material (MPa); τ_{xy} = tensão de cisalhamento desenvolvida no impacto (MPa); A= área efetiva da seção (m²) considerando a corrosão.

A Tabela 10 apresenta o esforço cortante admissível para a estaca alvo de estudo.

Tabela 10 – Esforço Cortante Admissível

Estaca	Esforço Cortante Admissível (kN)
Estaca 1200 mm e 21 mm espessura Espaçamento de 1,20 m (entre estacas)	2.106,00

5.1.2.7 Verificação de zonas de plastificação

É realizada a verificação do comportamento do maciço frente às solicitações devido a condição não drenada. O modelo constitutivo adotado será o Modelo de Mohr-Coulomb e a simulação numérica foi feita pelo método de elementos finitos.

5.1.2.8 Fatores de segurança por *Shear Strength Reduction* – SSR

O método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (*Shear Strength Reduction* – SSR) é uma abordagem utilizada em análises de estabilidade baseadas no método de elementos finitos, que permite a consideração do comportamento tensão-deformação dos materiais e a interação entre o solo e elementos estruturais, como estacas (Resende, 2021). Essa metodologia consiste na aplicação progressiva de um fator de redução (*Shear Reduction Factor* – SRF) sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo — coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) — até que o modelo numérico atinja a condição de ruptura.

Segundo Rocscience (2025), a análise é realizada de forma iterativa, reduzindo-se gradualmente os parâmetros resistentes até que o equilíbrio do sistema não seja mais alcançado, identificando assim o valor de SRF que corresponde ao fator de segurança crítico da estrutura. A principal vantagem deste método é a capacidade de simular o comportamento não linear do solo e os mecanismos de deformação progressiva até a falha, o que o torna particularmente útil para cenários envolvendo reforço com estacas e outras soluções geotécnicas.

Embora não haja um fator de segurança mínimo estabelecido especificamente para análises por SSR, adota-se, por analogia às recomendações tradicionais de estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite, o valor de $FS \geq 1,3$ (Resolução ANM nº 95/2022) como referência para a avaliação da segurança da estrutura.

5.1.3 Análise de equilíbrio limite

Para avaliação da segurança da estrutura, foram realizadas análises de estabilidade por dois métodos de análise, baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, sendo eles: Morgenstern-Price e Spencer, por meio do programa computacional de estudos bidimensionais Slide®. Foram verificadas superfícies de ruptura de forma não circular, procurando cercar todas aquelas prováveis de ruptura.

As análises de estabilidade determinísticas pressupõem a definição de alguns critérios e configurações no software Slide2. Quais sejam:

- Número de fatias: 50;
- Tolerância de cálculo: 0,005;
- Método de equilíbrio limite com a formulação de Spencer e Morgenstern-Price;
- Superfícies de ruptura não-circulares;
- Método de busca da superfície: Cuckoo search (com otimização);
- Critérios de resistência de Mohr-Coulomb para condições drenadas e razão de resistência para condições não drenadas.

Os parâmetros de resistência para os materiais foram definidos a partir de valores da literatura e estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de resistência dos materiais

MATERIAL	ENVOLTÓRIA RESISTÊNCIA	γ	c'	ϕ'	$Su/\sigma'v$
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(°)	(Pico)
Rejeito	Mohr-Coulomb	21	2	26,2	0,19
Aterro	Mohr-Coulomb	18	7,7	29	-
Fundação 1	Mohr-Coulomb	21	3	22	0,29
Fundação 2	Mohr-Coulomb	22	14,7	41,9	-
Fundação 3	Mohr-Coulomb	23,8	41,1	39,7	-
Enrocamento	Leps superior	Envoltória de Leps (Superior)			-

5.1.3.1 Estágios de análise

Foram considerados três cenários conforme NBR 13.028/2024 e a Resolução ANM N° 95/2022, quais sejam: condição drenada (estática), mobilização não drenada de pico (estática) e análise pseudoestática considerando parâmetros não drenados de pico para materiais contráteis. Essas análises foram realizadas para condição atual da estrutura e condição após reforço.

5.1.3.2 Fatores de segurança

O fator de segurança mínimo adotado para as análises de estabilidade está detalhado na Tabela 12.

Tabela 12 – Fatores de segurança mínimos exigidos pelas normas para os diferentes cenários de análises de estabilidade

ANÁLISES DE ESTABILIDADE				
CENÁRIO	ANÁLISE		FS mínimo	REFERÊNCIA
1	Drenado	Estática. Parâmetros efetivos	1,5	ABNT NBR 13.028/2024
2	Não Drenada	Estática. Resistência não drenada de pico nos materiais com comportamento contrátil e saturados.	1,3	Resolução ANM N° 95
3		Pseudoestática Carregamento sísmico (kh) de 0,04g e resistência não drenada de pico nos materiais com comportamento contrátil e saturados.	1,1	ABNT NBR 13.028/2024

6 RESULTADOS

6.1 ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DE EMBUTIMENTO DA ESTRUTURA

6.1.1 Metodologia IPA

O comprimento de embutimento das estacas necessário para garantir a estabilidade do sistema foi obtido por meio da utilização do manual desenvolvido pela International Press-in Association (IPA, 2019) e apresentado no item 4.4

Esse dimensionamento preliminar deve ser utilizado como estimativa do comprimento necessário para obtenção da resposta de engastamento da extremidade embutida da estaca, não sendo um critério de projeto. Caso seja comprovado o engastamento pela plataforma de elementos finitos, com a obtenção de deslocamentos desprezíveis na extremidade inferior da estaca, esse comprimento calculado pode ser otimizado. Os cálculos do comprimento de embutimento para a estrutura de contenção estão indicados na Tabela 13 e foram obtidos conforme aplicação da metodologia apresentada no item 5. Foi adotado como referência para o cálculo do comprimento de embutimento da estaca, o módulo de elasticidade equivalente aos solos que estaca atravessa, apresentando o valor de $E = 49500$ kPa.

Tabela 13 – Valores calculados para obtenção do comprimento de embutimento

Inputs necessários para cálculo de ficha	Valor
Diâmetro das estacas (mm)	1200
Espessura das estacas (mm)	21
Corrosão considerada (mm)	1,2
Espaçamento entre eixos das estacas (mm)	2400
I estado plano (m ⁴)	5,1E-03
Elasticidade da estaca (Pa)	2,06E+11
α	1
k_{HO} (Yoshida e Adachi, 1970)	2,22E+08
k_H (Okahara e Takagi, 1990)	1,60E+07
k_H (Broms e Francis, 1968)	2,91E+07
β (m/m)	3,02E-01
L (m) – Estrutura Permanente	11,54

Considerando que a contenção será uma estrutura de caráter permanente, o embutimento calculado foi de 11,54 m, sendo adotado o valor de 12,00 m.

6.2 DIMENSIONAMENTO POR METÓDOS NUMERICOS

6.2.1 Análise de percolação

Para representar a condição atual da Barragem, é apresentada na Figura 23 as linhas equipotenciais e de fluxo para a seção da estrutura. A Figura 24 apresenta-se a condição após implantação das estacas. A Figura 25 apresenta um comparativo entre as duas análises na região do pé da estrutura, sendo a região de maior impacto.

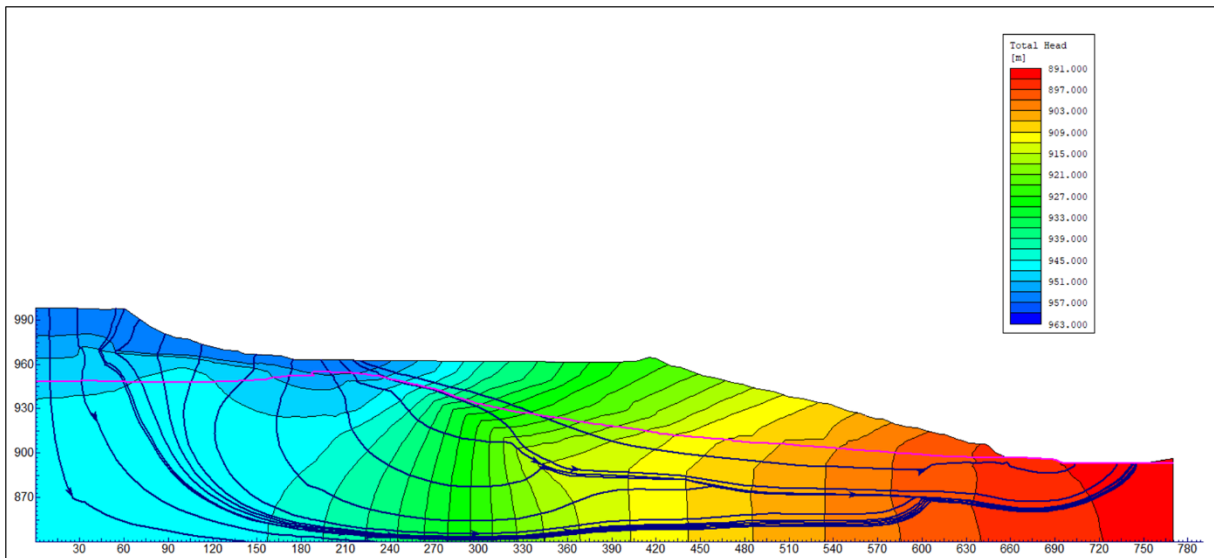


Figura 23– Equipotenciais e linhas de fluxo – Antes da implantação do reforço

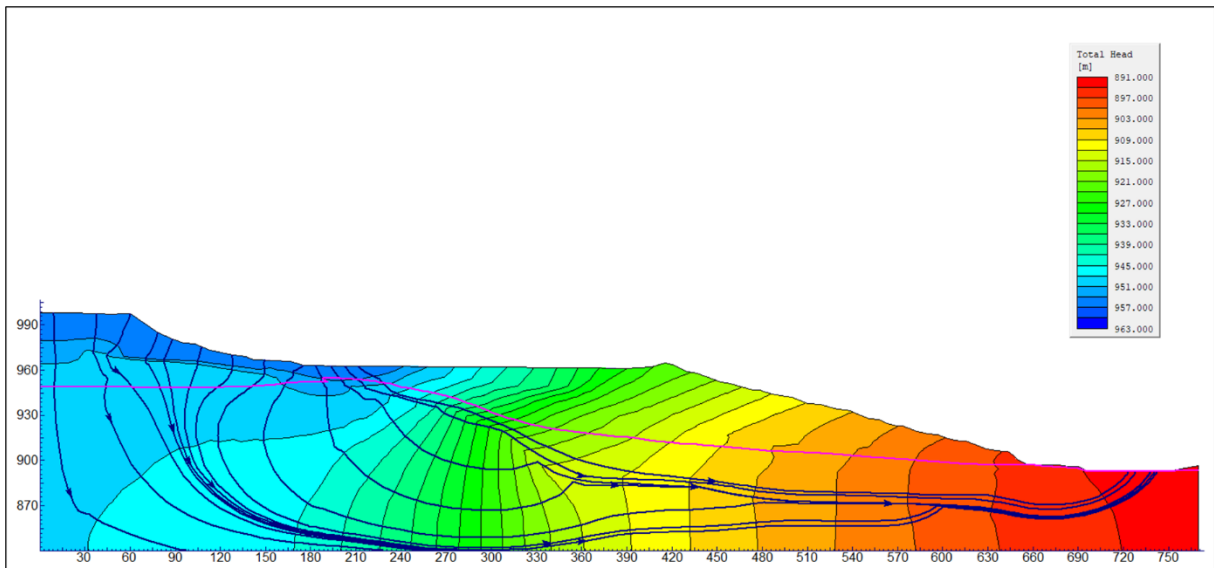


Figura 24– Equipotenciais e linhas de fluxo – Após implantação de reforço

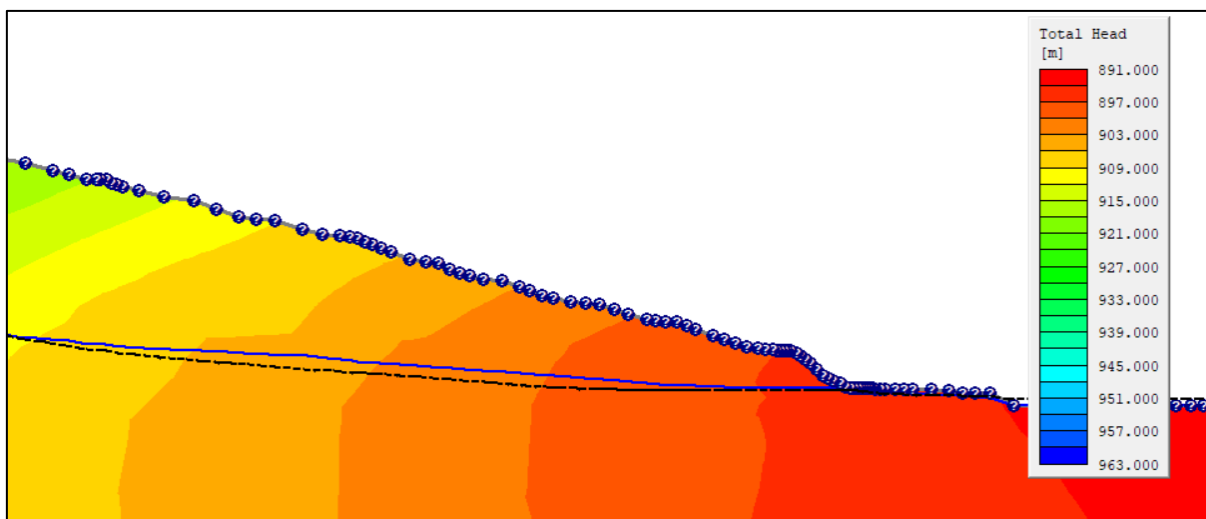


Figura 25– Nível freático cenário sem estaca (linha preta e tracejada) e cenário com estaca (linha azul contínua) - Região de alteração mais significativa

Como pode se observar nas figuras, ao simular a condição de fluxo em um cenário de implantação das estacas, nota-se que o nível freático não se altera de forma significativa no interior do maciço. Ou seja, a condição freática/piezométrica no interior do maciço não é afetada pela implantação das estacas. Contudo, cabe mencionar que o gradiente hidráulico de saída do fluxo é também afetado pela redução da área drenante, conforme será detalhado no item **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Vale ressaltar, novamente, que uma análise considerando efeitos em três dimensões se faz importante para condições reais de projeto, para verificação de pontos específicos de concentração de fluxo e as devidas tratativas, caso sejam necessárias.

Para avaliação da possibilidade de ocorrência de erosão progressiva, a Figura 26 ilustra a localização das seções de controle C1 e C2 para as análises de percolação apresentadas no item 6.2.1, enquanto a Tabela 14 apresenta os gradientes hidráulicos obtidos em cada seção de controle, C1 e C2.

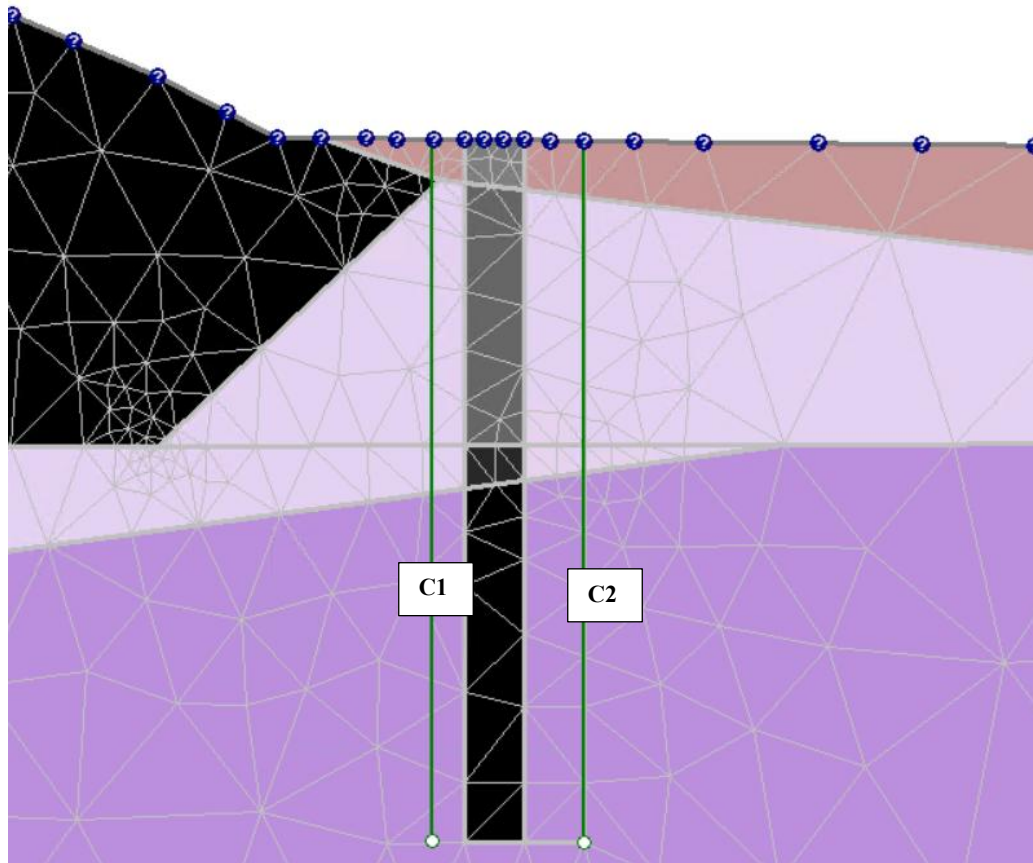


Figura 26– Verificação de gradiente hidráulico após implantação de reforço

Tabela 14 – Gradiente Hidráulico – Seções de controle

Seção	Material	Q (m ³ /d) ²	Q (m ³ /s)	k (m/s)	h (m)	L (m)	A (m ²)	i	FS
C1	Aterro	1.97	2.28E-05	1.00E-05	2.32	1.2	2.784	0.818 ¹	1,00
	Fundação 1	1.73	2.00E-05	5.00E-05	8.25	1.2	9.9	0.040	20,00
	Fundação 2	3.06	3.55E-05	1.00E-03	1.42	1.2	1.704	0.021	38,10
C2	Aterro	0.07	8.51E-07	1.00E-05	2.32	1.2	2.784	0.031	25,81
	Fundação 1	2.06	2.39E-05	5.00E-05	8.25	1.2	9.9	0.048	16,67
	Fundação 2	3.11	3.59E-05	1.00E-03	1.42	1.2	1.704	0.021	38,10

Nota:

¹ gradiente crítico de 0,80 (Equação 18)

² no software o valor é dado por metro linear, o valor da vazão foi multiplicado por 2,4 (1,2 m de estaca e 1,2 m de espaçamento) de forma a representar a condição real de fluxo;

Conforme ilustram os resultados, no cenário de implantação das estacas, o estrangulamento do fluxo causado pela permeabilidade nula do elemento de aço não afeta grandemente os gradientes hidráulicos nas seções avaliadas, mostrando a maioria dos gradientes hidráulicos abaixo de 0,05. Apenas a camada de aterro apresenta FS de 1,0, com gradiente hidráulico de 0,818 na seção de controle C1, valor abaixo do permissível considerado, ($FS_{\min} = 4$).

Visto ser uma camada superficial, as tratativas para melhoramento desses gradientes passam por uma implantação de dreno invertido com camadas granulares de transição a jusante

do dreno de pé da barragem até o alinhamento das estacas, de forma a evitar o carreamento de material por meio da dissipação do acúmulo de energia pelo material drenante. A Tabela 15, apresenta os gradientes hidráulicos após implantação do dreno invertido, demonstrando a eficácia da solução, com redução do gradiente e aumento do fator de segurança, apresentando o menor FS superior a 10.

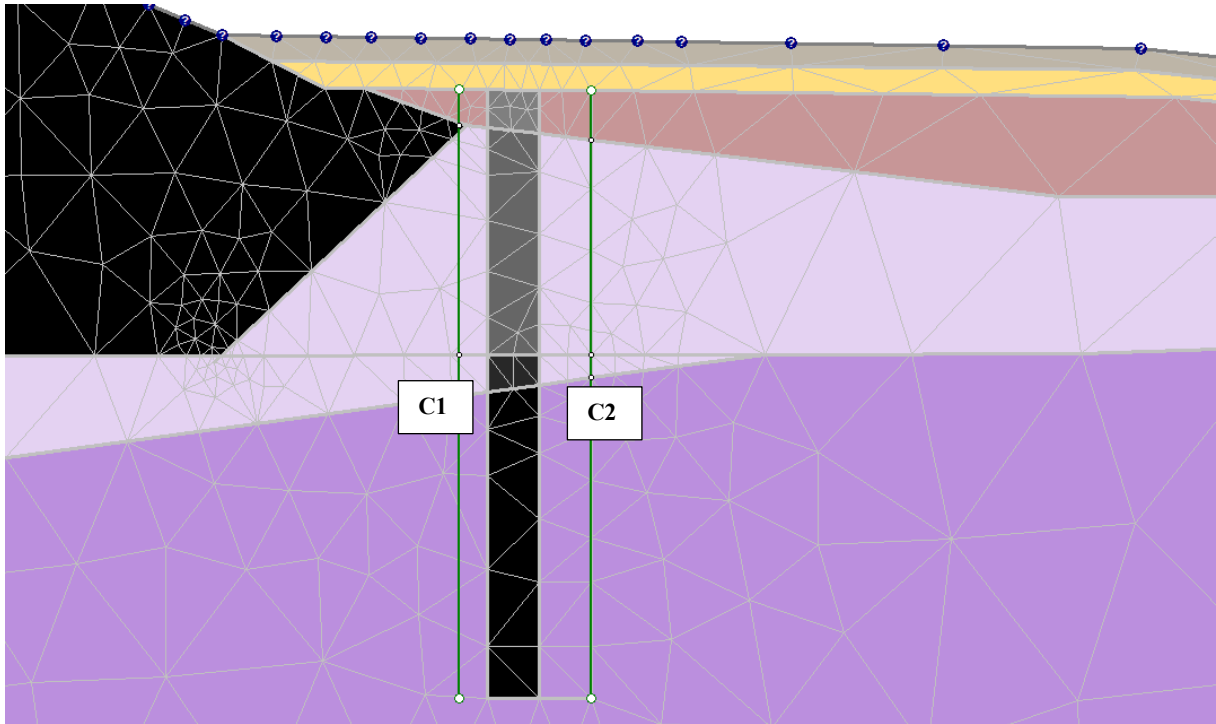


Figura 27– Verificação de gradiente hidráulico após implantação de reforço e dreno invertido

Tabela 15 – Gradiente Hidráulico – Seções de controle – após implantação do dreno invertido

Seção	Material	Q (m ³ /d) ¹	Q (m ³ /s)	k (m/s)	h (m)	L (m)	A (m ²)	i	FS
C1	Aterro	0,18	2,12E-06	1,00E-05	2,32	1,20	2,78	0,076	10,52
	Fundação 1	2,52	2,92E-05	5,00E-05	8,25	1,20	9,90	0,059	13,55
	Fundação 2	5,11	5,91E-05	1,00E-03	1,42	1,20	1,70	0,035	23,06
C2	Aterro	0,09	1,06E-06	1,00E-05	2,32	1,20	2,78	0,038	20,93
	Fundação 1	2,41	2,79E-05	5,00E-05	8,25	1,20	9,90	0,056	14,21
	Fundação 2	3,75	4,34E-05	1,00E-03	1,42	1,20	1,70	0,025	31,39

Nota:

¹ no software o valor é dado por metro linear, o valor da vazão foi multiplicado por 2,4 (1,2 m de estaca e 1,2 m de espaçamento) de forma a representar a condição real de fluxo;

6.2.2 Análise tensão x deformação

Os resultados aqui detalhados fazem menção aos cenários elencados no item 5.1.2.2, sendo Cenário Atual – Condição Drenada sem reforço, Cenário de Cravação de Estaca – Condição Drenada e por fim o Cenário Não Drenado de Pico após cravação das estacas. Da

Figura 28 até a Figura 31, são apresentados as máximas deformações cisalhantes, da Figura 32 a Figura 34 os deslocamentos totais e por fim da Figura 35 a Figura 38 os elementos de plastificação.

6.2.2.1 Máxima deformação cisalhante

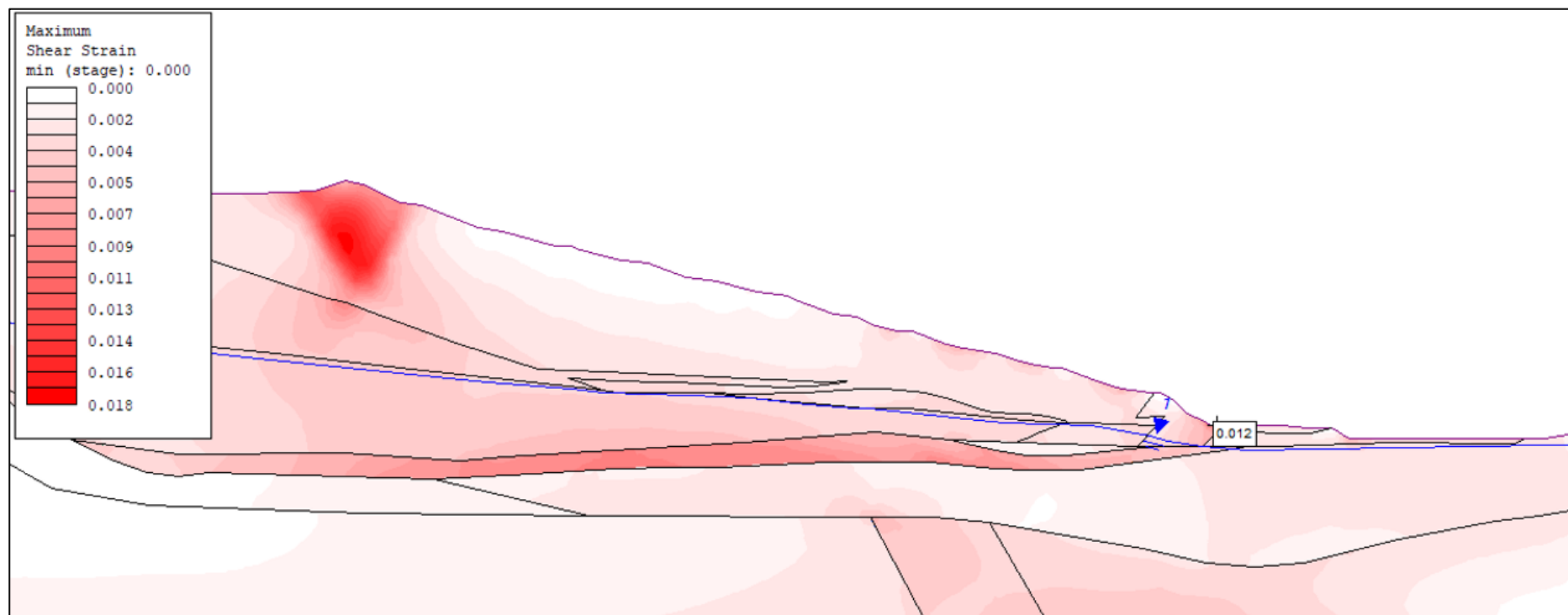


Figura 28 – Máxima deformação cisalhante – Condição Drenada sem Reforço

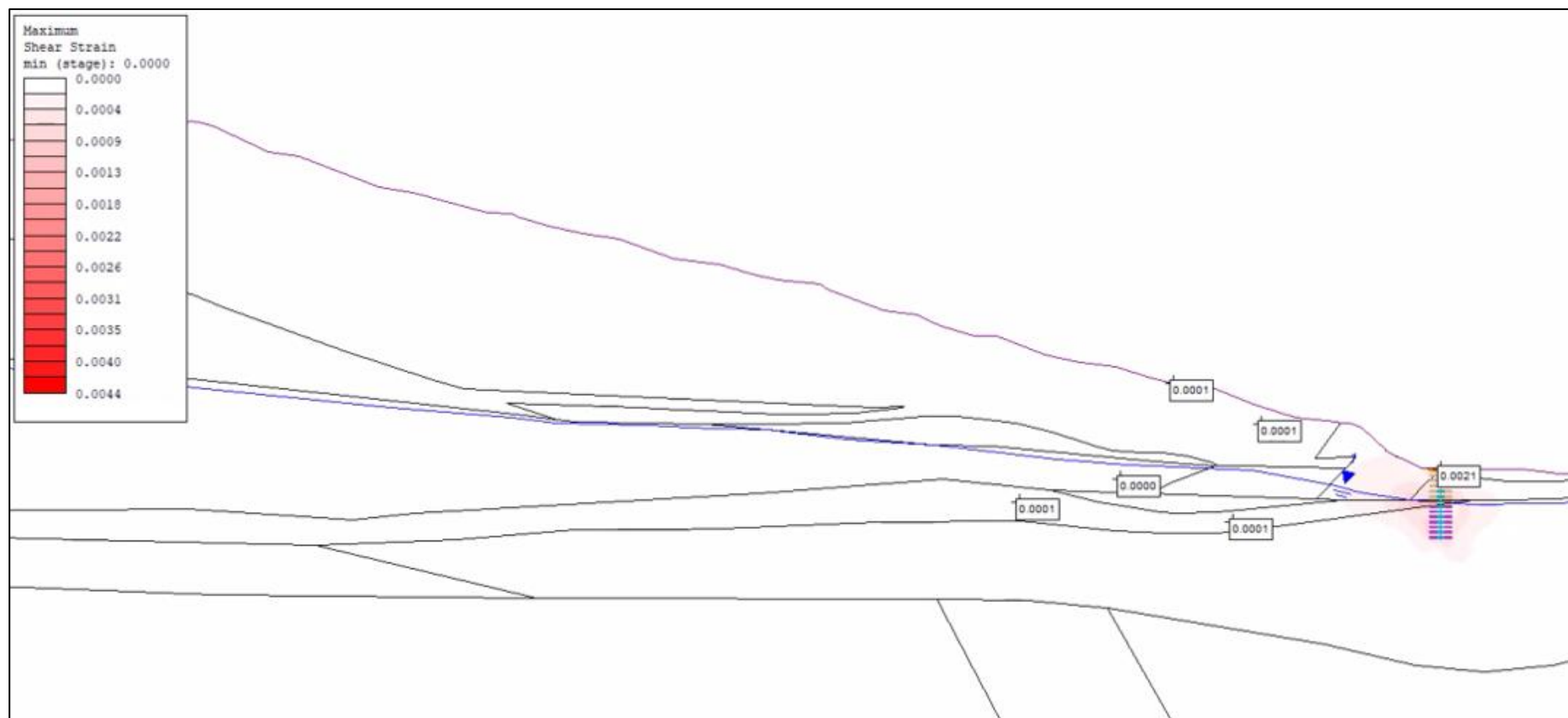


Figura 29 – Máxima deformação cisalhante – Cravação das Estacas – Drenada

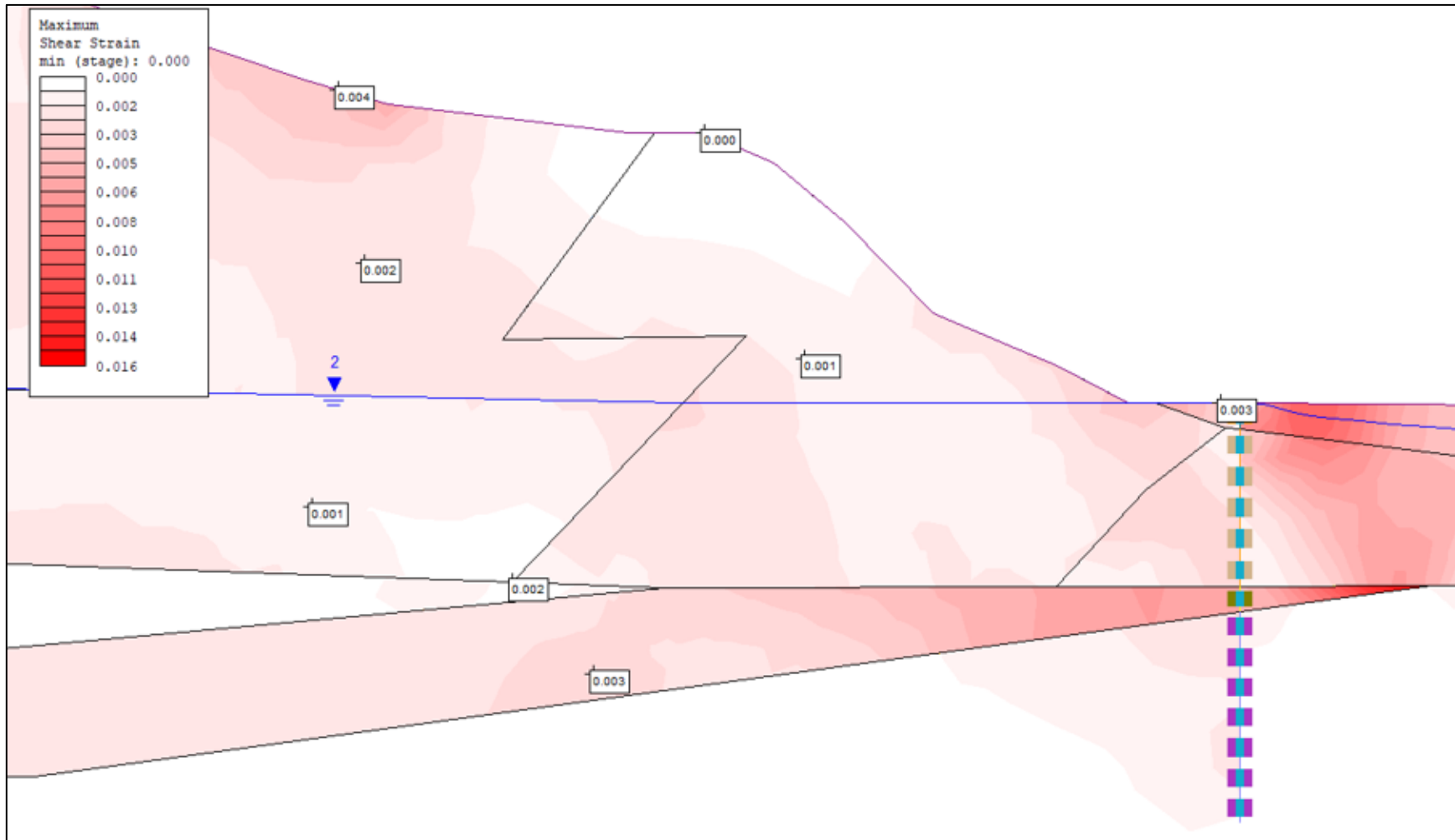
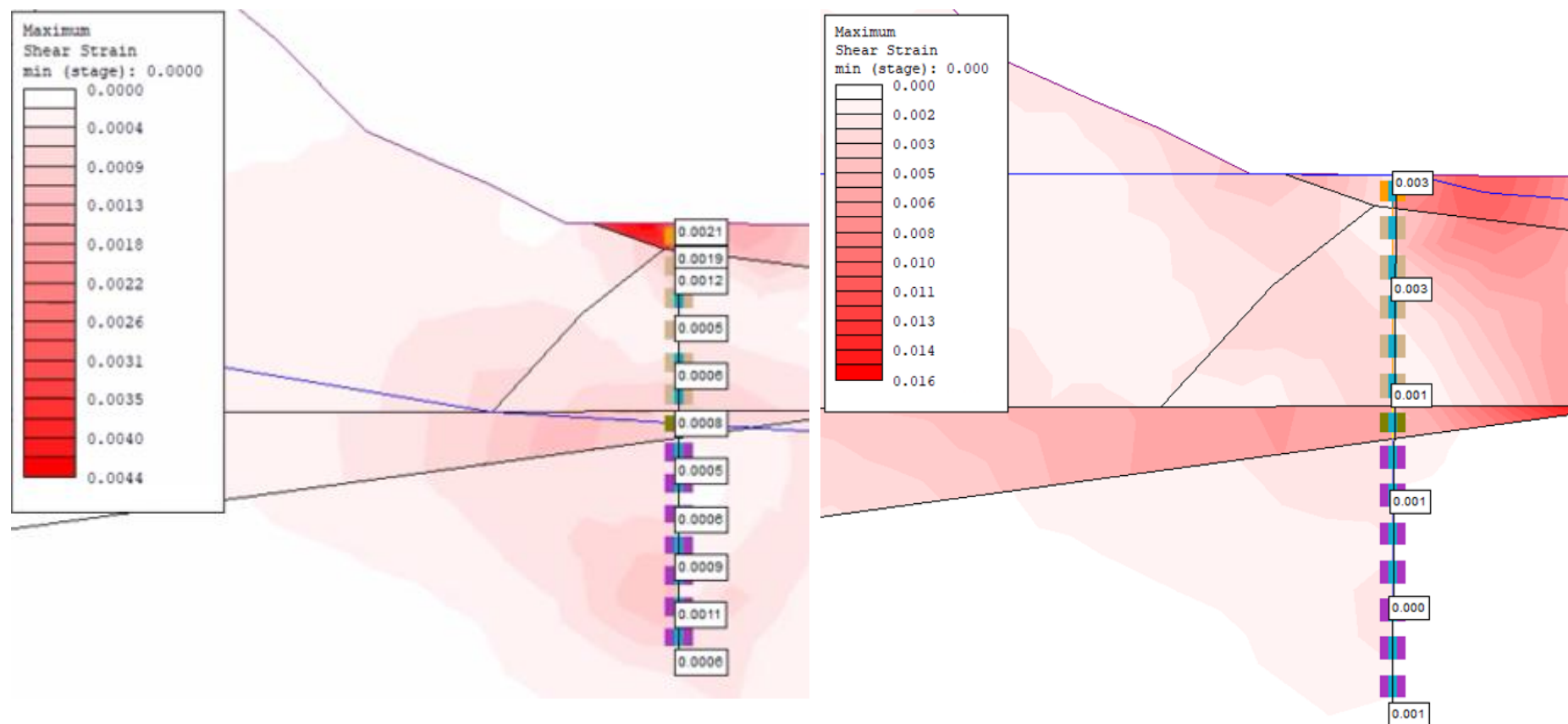


Figura 30 – Máxima deformação cisalhante – Reforçada com Estacas – Não Drenada



Cravação das Estacas – Drenada

Reforçada com Estacas – Não drenada

Figura 31 – Máxima Deformação Cisalhante – Detalhamento – Cenário Reforçado com Estacas

6.2.2.2 Deslocamentos Totais

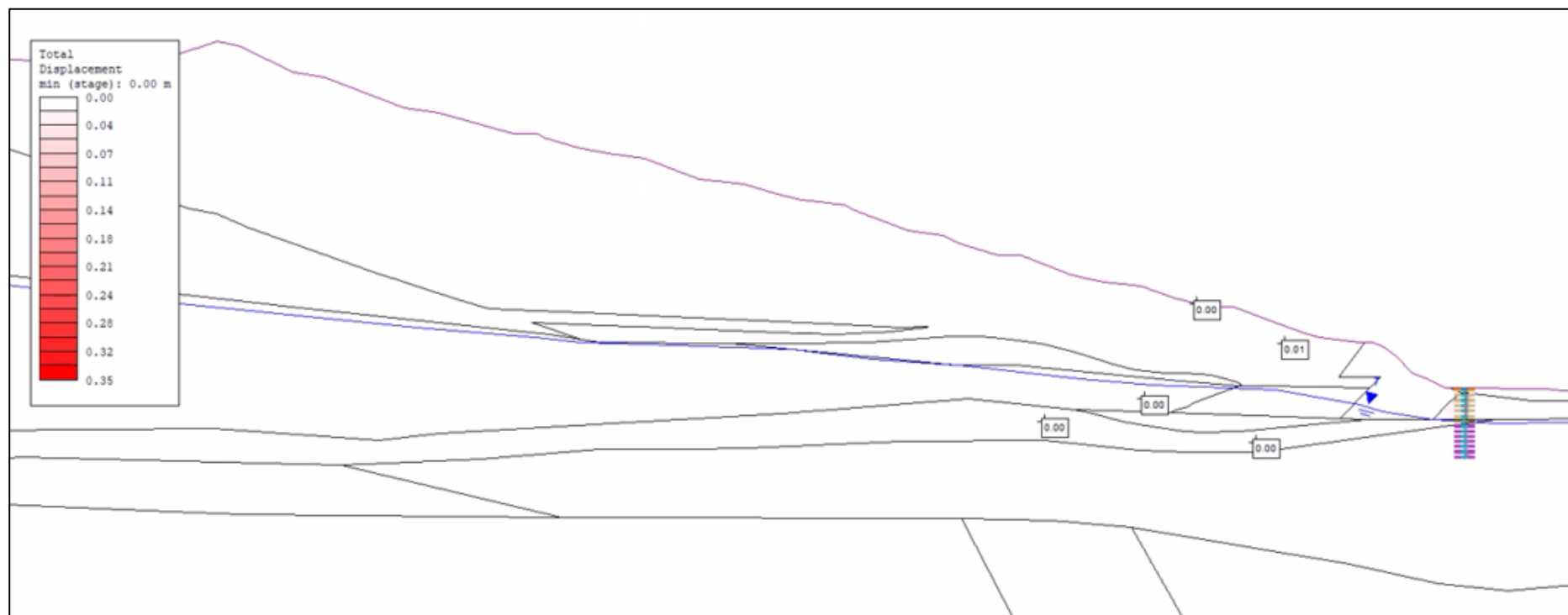


Figura 32 – Deslocamentos Totais – Cravação das Estacas - Drenada

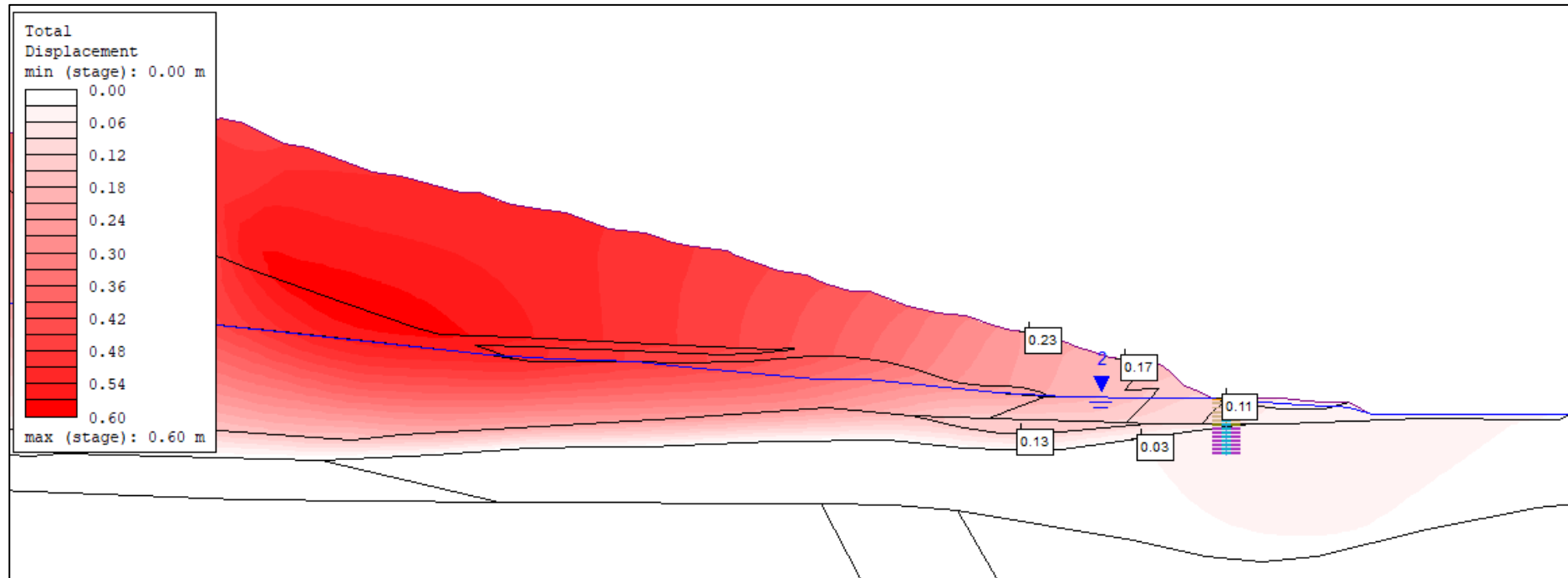
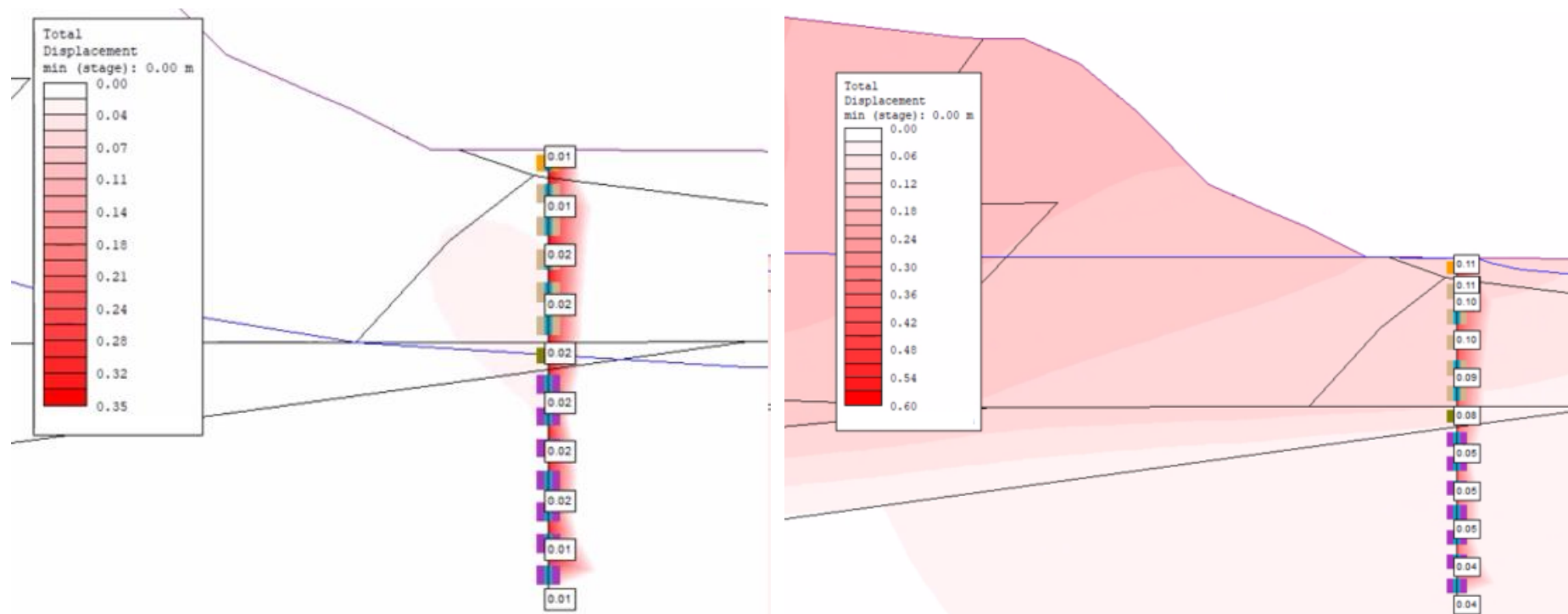


Figura 33 – Deslocamentos Totais – Reforçada com Estacas – Não Drenada



Cravação das Estacas – Drenada

Reforço com Estacas – Não drenada

Figura 34 – Deslocamentos Totais – Detalhamento – Cenário Reforçado com Estacas

6.2.2.3 Zonas de Plastificação

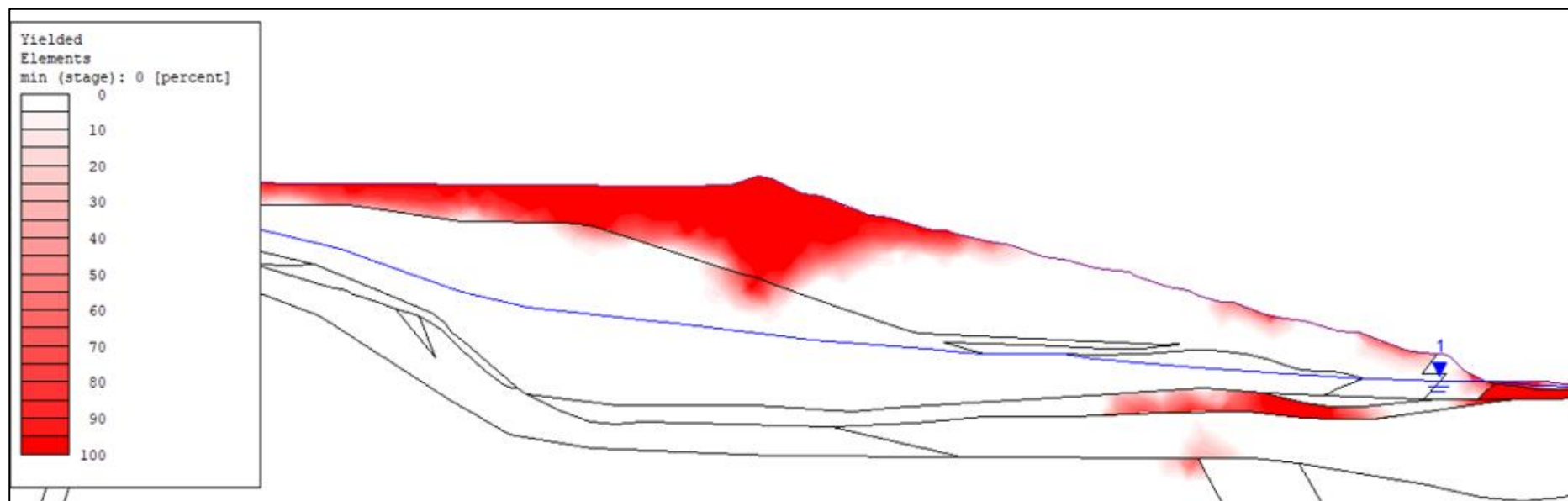


Figura 35 – Zonas de Plastificação – Condição Drenada sem Reforço

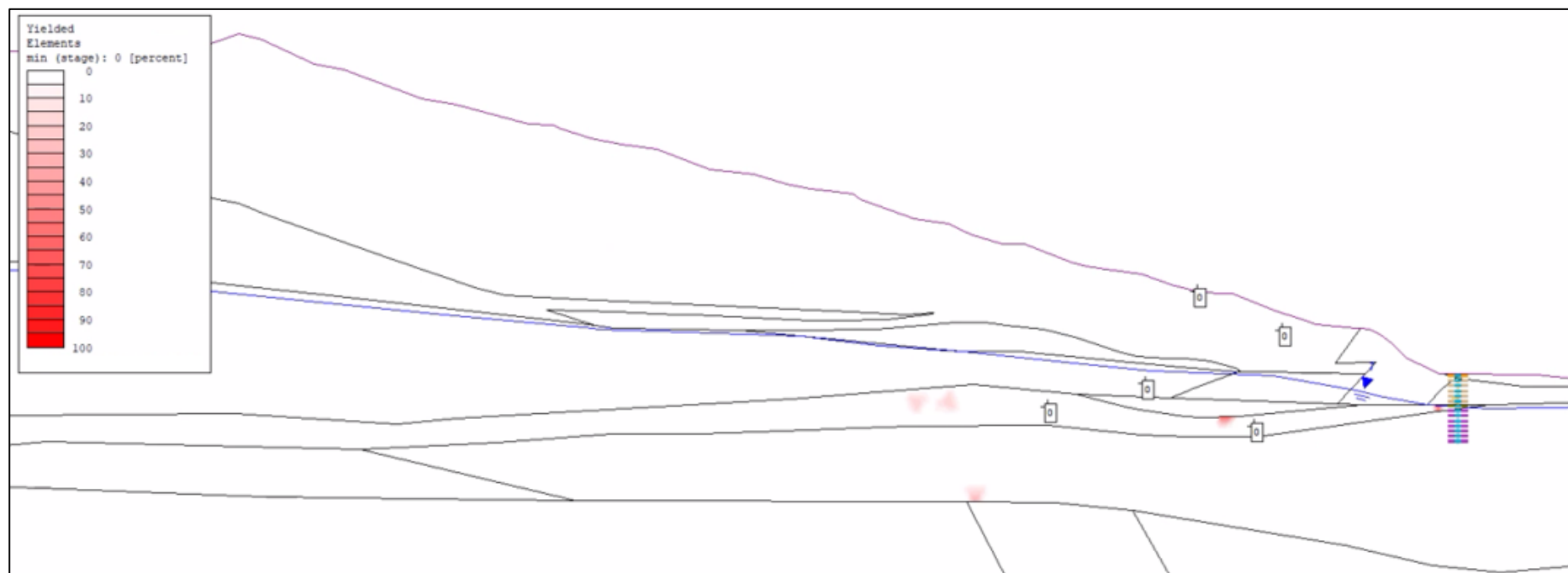


Figura 36 – Zonas de Plastificação – Cravação das Estacas – Drenada

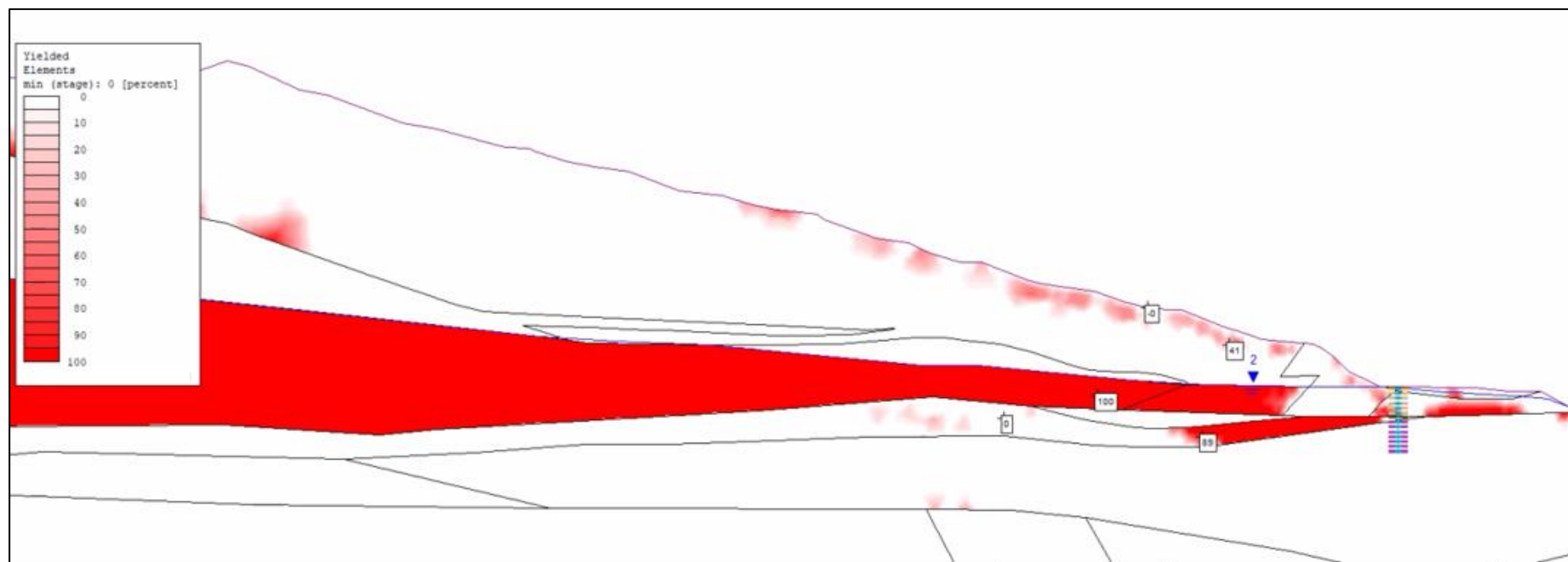
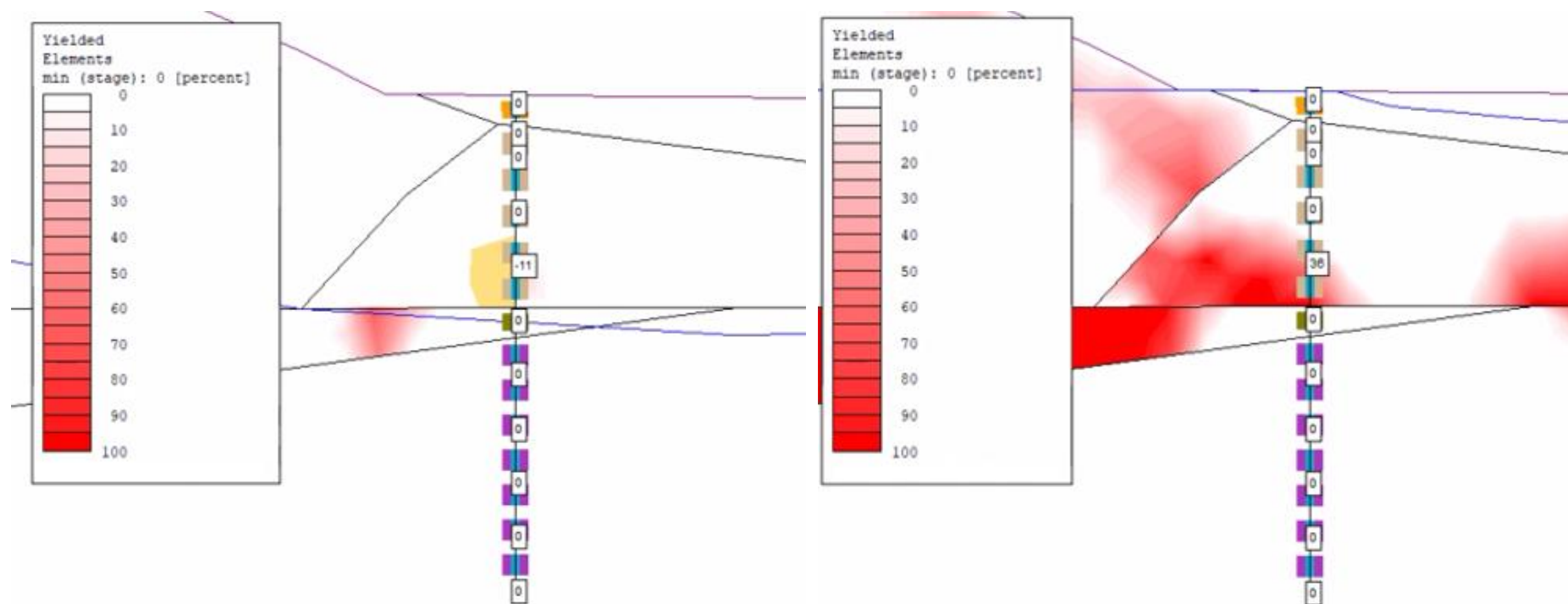


Figura 37 – Zonas de Plastificação – Reforçada com Estacas – Não Drenada



Cravação das Estacas – Drenada

Cravação das Estacas – Não drenada

Figura 38 – Zonas de Plastificação – Reforçada com Estacas

6.2.2.4 Avaliação estrutural – Momento e Força Cisalhante

A análise estrutural se faz necessária para verificação dos esforços solicitantes que atuam na estaca. Dessa maneira, a análise estrutural foi realizada por meio de análises tensão deformação, no software RS2 da Rocscience. A Figura 39 ilustra o diagrama de momentos e a Figura 40 o esforço cortante obtido.

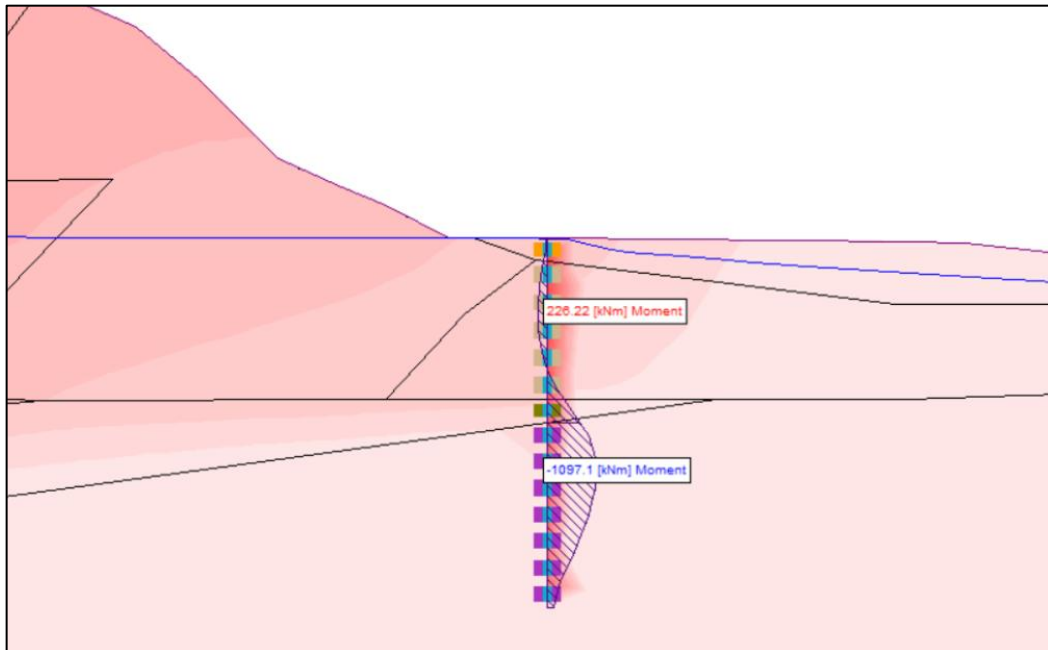


Figura 39 – Diagrama de momento – Avaliação Estrutural

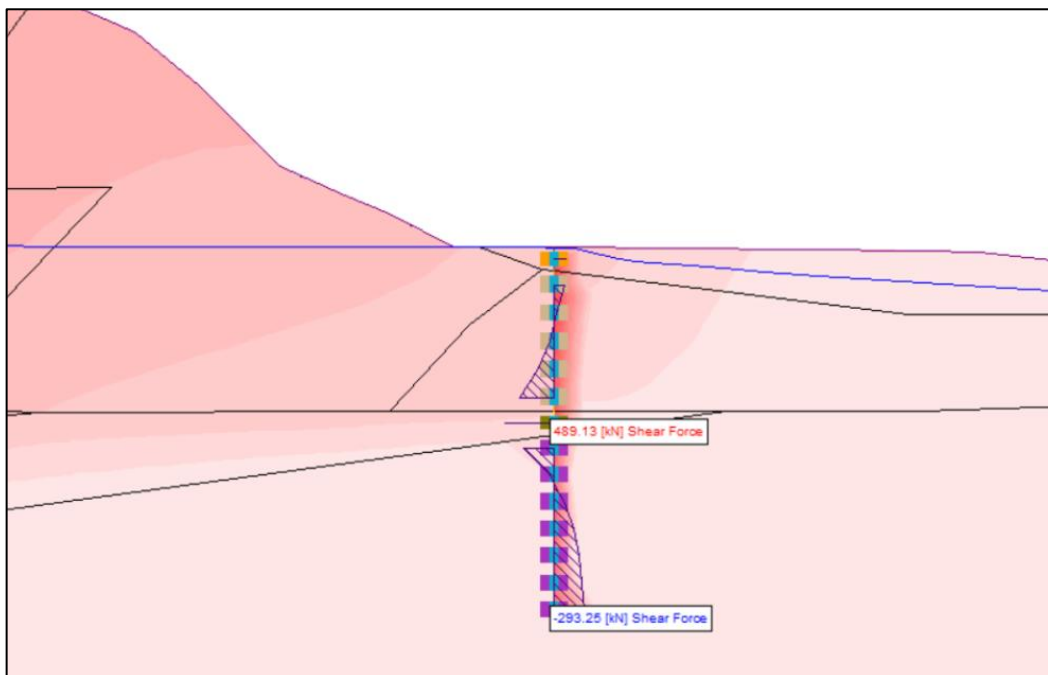


Figura 40 – Diagrama do esforço cortante – Avaliação Estrutural

Ao comparar os esforços solicitantes com os esforços resistentes pela estaca, apresentados anteriormente na Tabela 9 e Tabela 10, nota-se que todos os esforços solicitantes estão menores que os admissíveis pela estaca.

6.2.2.5 Fatores de segurança por Shear Strength Reduction – SSR

No que diz respeito às análises tensão deformação, uma das verificações é realizada por meio da técnica de *Shear Strength Reduction* (SRR). Este método consiste no uso sistemático da análise de elementos finitos para determinar um *Strength Reduction Factor* (SRF) que leva o talude a ruptura. Além disso, para calcular o SRF, foi utilizado o modelo de resistência de Mohr Coulomb que além do ângulo de atrito e coesão, considera também o módulo de elasticidade e coeficiente de poisson.

Cabe mencionar que a análise do SRF foi realizada de forma adicional, os cenários de sollicitação (deslocamentos e tensões cisalhantes) fazem menção ao cenário crítico da estrutura (condição não drenada), sem SRF. O valor de SRF apresentado nas análises apenas indica o fator de degradação dos parâmetros que pode ser comparado com o fator de segurança obtido por equilíbrio limite, o mecanismo de ruptura e as superfícies foram validadas por esse método, conforme linha preta apresentada na Figura 41 a qual representa a superfície de ruptura indicada na análise de estabilidade da Figura 46.

Dessa forma, as sollicitações não são referentes ao cenário mobilizado com parâmetros degradados (SRF) e sim para a condição crítica da estrutura (mobilização não drenada). A Figura 41 apresenta o SRF obtido.

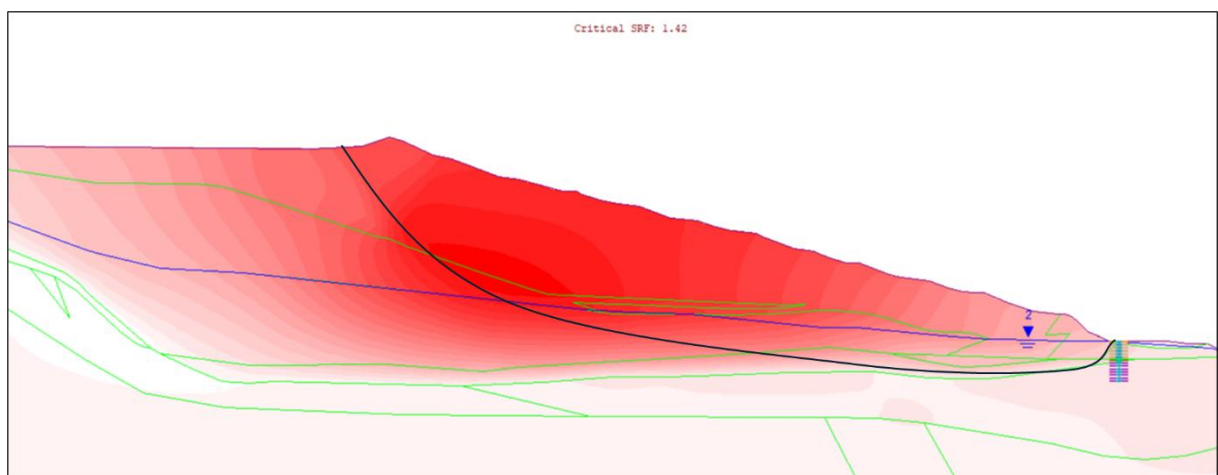


Figura 41 – Método SSR – *Critical* SRF – Destaque para linha preta representando cunha da análise de estabilidade.

6.2.2.6 Discussão dos resultados da análise de tensão x deformação

De forma geral, após as verificações quanto ao deslocamento, deformação, plastificação e estados de tensão deformação, observa-se que a estrutura em conjunto com as estacas de reforço de fundação apresenta um bom comportamento mesmo em cenários hipotéticos e críticos de mobilização não drenada de pico. Nota-se a formação de uma zona de plastificação no trecho de rejeito não drenado (Figura 37), o que era esperado visto a condição do material sobre esse cenário hipotético, no entanto a Figura 30 apresenta baixas deformações cisalhantes, e que não ocorre a formação de uma conexão entre as regiões de deformações cisalhantes, não tendo assim indicativo de falha ou colapso da estrutura. Isso é corroborado pelos deslocamentos apresentados na Figura 34, onde observa-se valores de deslocamentos na barragem de 0,5% em relação a altura total da mesma e baixos deslocamentos no pé da estrutura, devido o posicionamento da estaca que impede o deslocamento do conjunto.

Cabe mencionar também que as análises realizadas pela técnica de *Shear Strength Reduction* (SRR) demonstram que, seria necessário uma degradação e redução dos parâmetros de 42% para levar a Barragem à falha, em um cenário de mobilização não drenada. A Tabela 16 resume os resultados encontrados nas análises de tensão x deformação.

Tabela 16 – Resultados da Análise de Tensão x Deformação – Condição Final

ANÁLISES	OBTIDO	ADMISSÍVEL
Deslocamentos Totais (cm)*	11	≤ 12 (1%)
Momento Fletor Máximo (kN/m)	1.097,10	≤ 2.030,00
Esforço cortante máximo (kN)	489,13	≤ 2.106,32
Fator de redução da resistência (SRF)	1,42	≥ 1,30

6.2.3 Análise de equilíbrio limite

6.2.3.1 Condição atual

Neste item serão descritos os resultados obtidos para a condição atual da Barragem. A Figura 42 até a Figura 44 apresentam as superfícies de ruptura obtidas para cada cenário. Já a Tabela 17 resume os fatores de segurança obtidos, demonstrando o FS menor que o recomendado no item 5.1.3.2. Dessa forma, deverá ser proposto elementos de reforço para a estrutura.

Tabela 17 – Resultados da Análise de Equilíbrio Limite – Condição inicial

Cenário	FS Calculado	FS Mínimo
Drenado	1,64	1,50
Não drenado	1,22	1,30
Pseudoestático	1,08	1,10

Notas:

¹ O fator de segurança abaixo do unitário não possui significado físico. Apenas indica que em um caso de solicitação sísmica a estrutura não seria capaz de absorver as solicitações, sendo iniciado o modo de falha da estrutura.

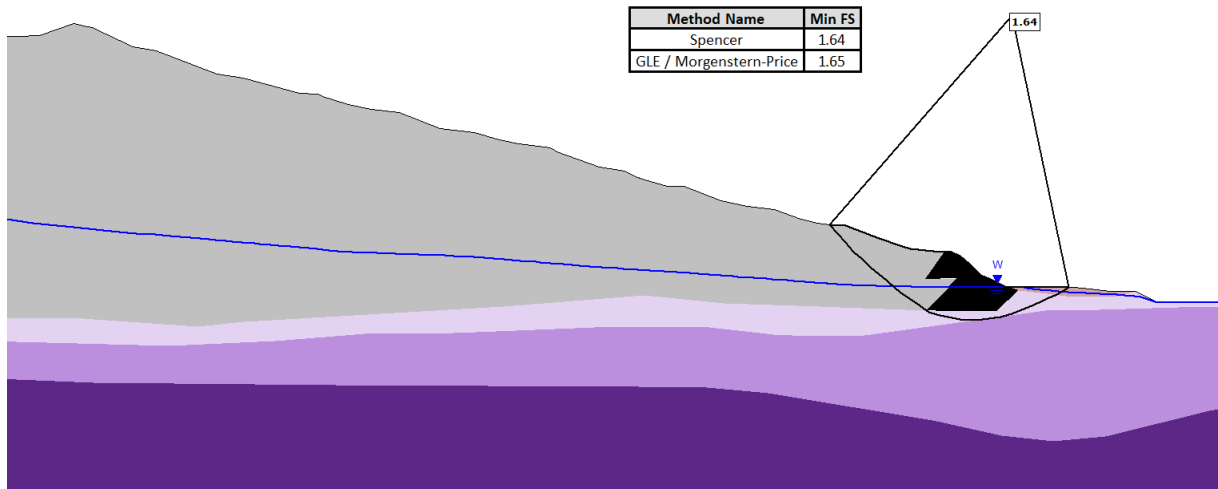


Figura 42 – Análise de estabilidade – Condição Drenada

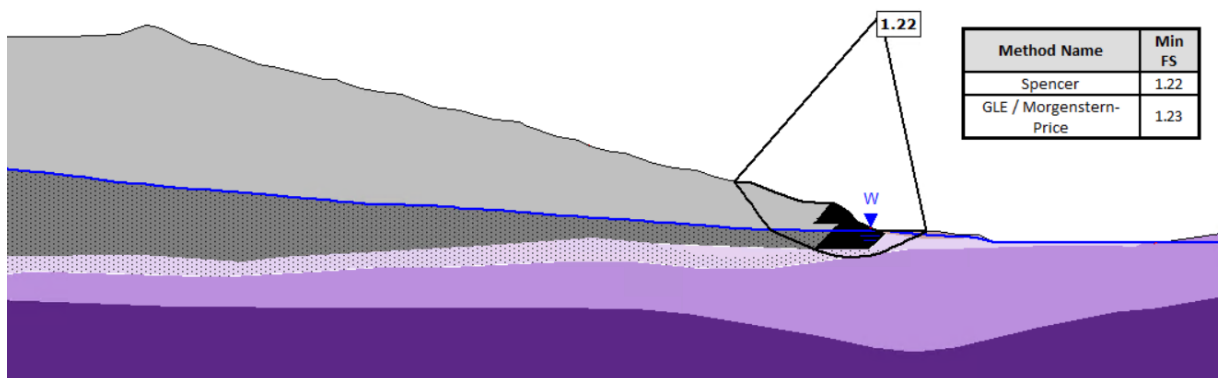


Figura 43 – Análise de estabilidade – Condição Não Drenada de Pico

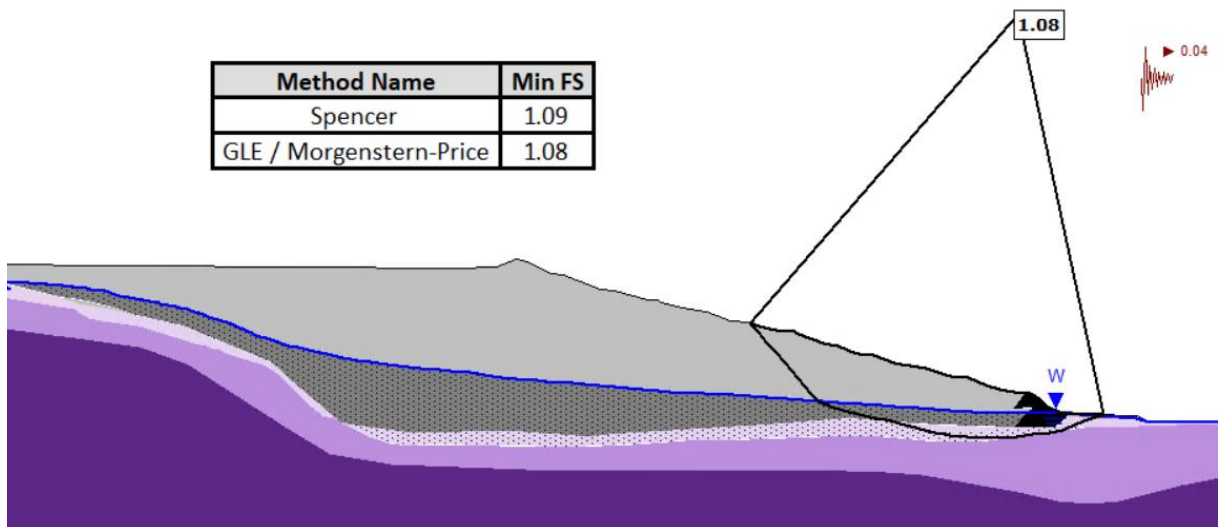


Figura 44 – Análise de estabilidade – Condição Pseudoestática

6.2.3.2 Condição final – Reforço implantado

Neste item serão descritos os resultados obtidos para a condição final da Barragem. A Figura 45 até a Figura 47 apresentam as superfícies de ruptura obtidas para cada cenário. A Tabela 18 resume os fatores de segurança obtido. Cabe mencionar que todos os valores são superiores aos mínimos estabelecidos na norma ABNT 13.028/2024 e Resolução nº 95/2022 (ANM).

Tabela 18 – Resultados da Análise de Equilíbrio Limite – Condição final

Cenário	FS Calculado	FS Mínimo
Drenado	1,79	1,50
Não drenado	1,34	1,30
Pseudoestático	1,16	1,10

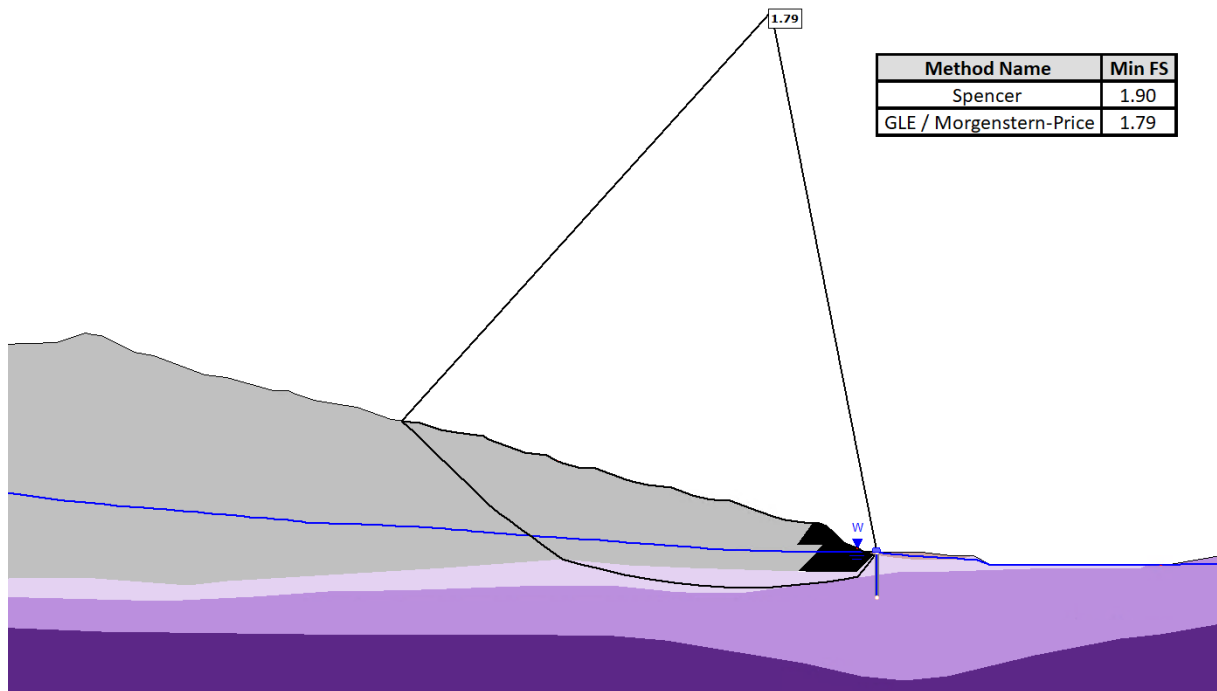


Figura 45 – Análise de estabilidade – Condição Drenada

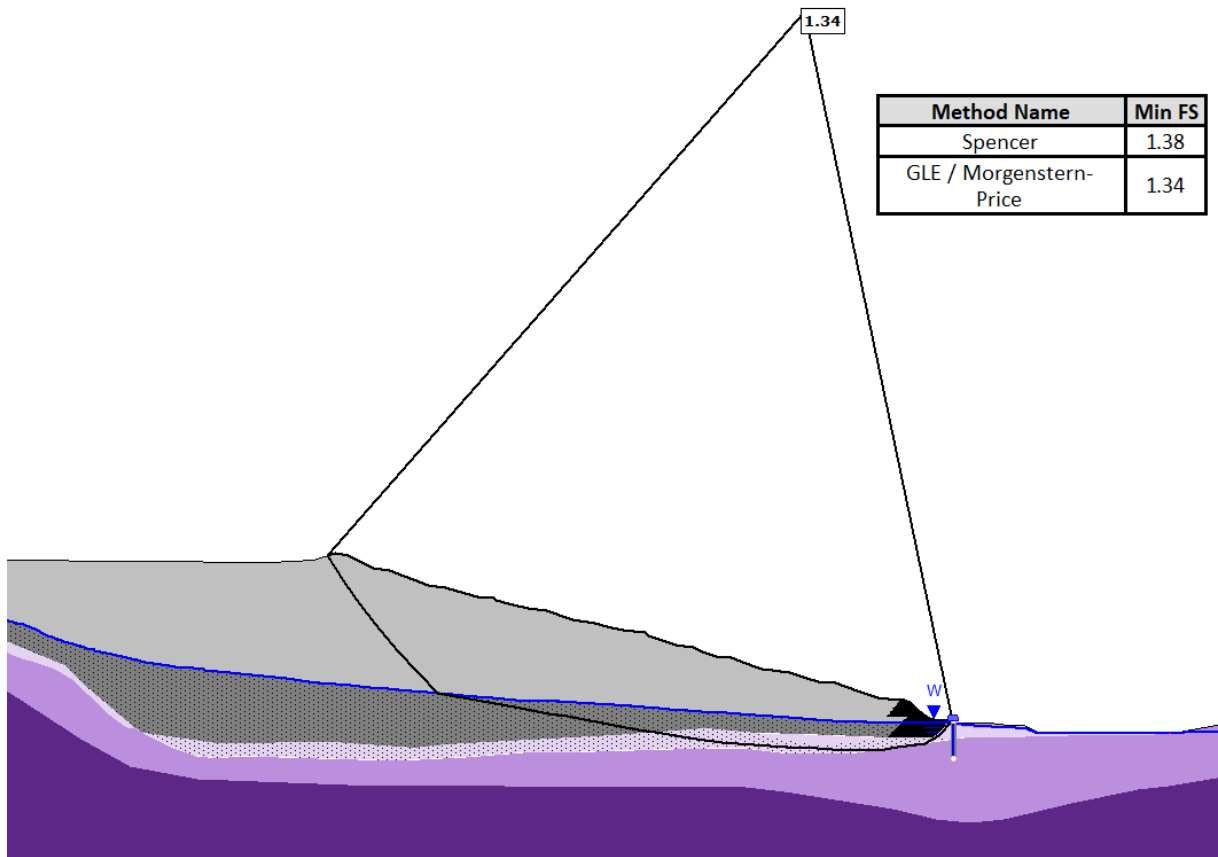


Figura 46 – Análise de estabilidade – Condição Não Drenada de Pico

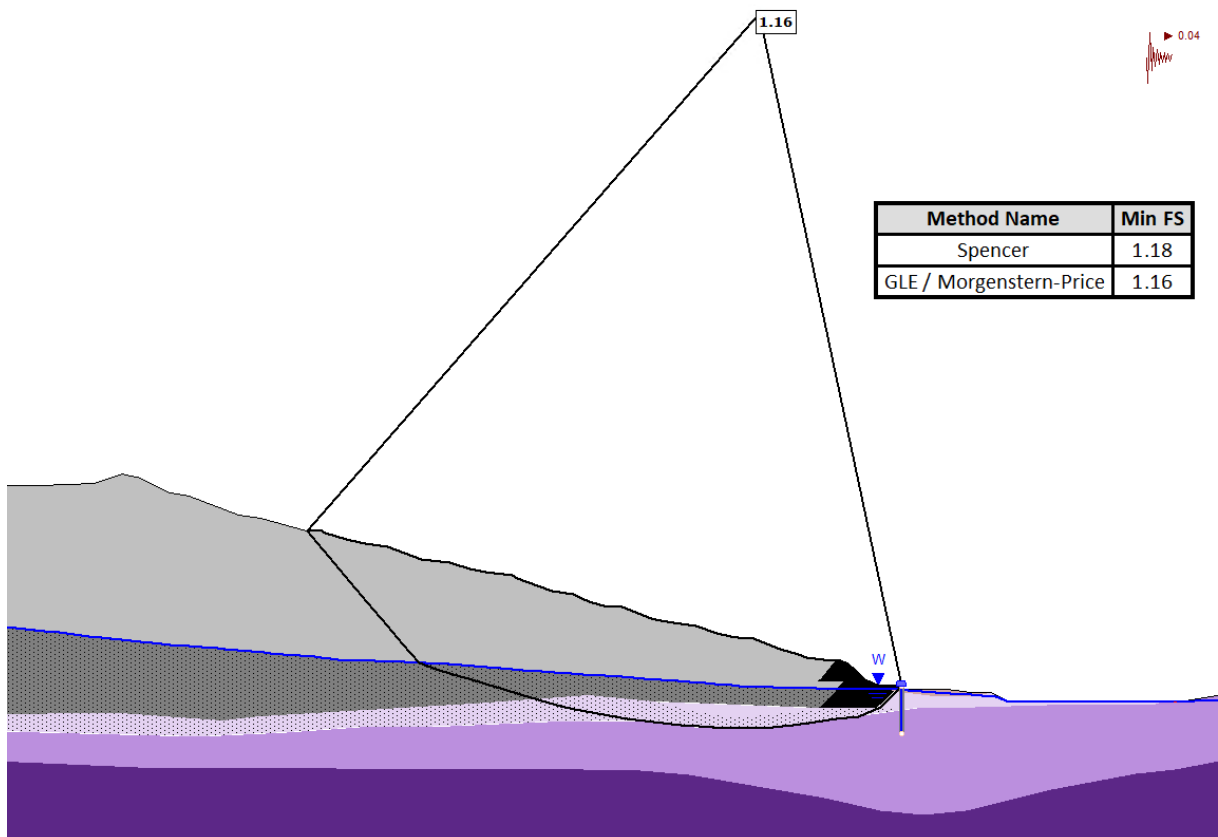


Figura 47 – Análise de estabilidade – Condição Pseudoestática

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das condições atuais de uma estrutura de barragem hipotética e das necessidades identificadas para seu reforço, conclui-se que a adoção de cortinas de estacas metálicas cravadas na região de jusante configura-se como uma solução viável e eficiente para o aumento da estabilidade global da estrutura.

As investigações foram conduzidas com base em uma seção representativa da barragem, na qual foram desenvolvidas análises de estabilidade, fluxo subterrâneo e comportamento tensão-deformação. A estimativa do comprimento de embutimento das estacas foi realizada considerando os critérios estabelecidos no manual técnico da *International Press-in Association* (IPA), complementados por análises numéricas por meio dos métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos. Os resultados demonstraram que a intervenção proposta é capaz de elevar o fator de segurança da estrutura a valores compatíveis com os limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 13.028:2024 e pela Resolução ANM nº 95/2022. Tal incremento está associado à capacidade das estacas em interceptar as potenciais superfícies de ruptura, especialmente aquelas localizadas na fundação, onde foram identificados materiais com baixa resistência ao cisalhamento, como a Fundação 1.

No que se refere ao comportamento do fluxo subterrâneo, as simulações indicaram que a presença das estacas não causará alterações significativas no nível freático, sendo o espaçamento de 1,20 m entre os elementos considerado satisfatório. Entretanto, observou-se um aumento pontual no gradiente hidráulico na região de saída do sistema de drenagem, o que indica a necessidade de intervenções complementares, como a instalação de drenos invertidos, para controle eficiente do fluxo.

As análises de tensão-deformação, por sua vez, apresentaram deslocamentos e deformações dentro dos limites aceitáveis, indicando desempenho estrutural compatível com os critérios de projeto. As simulações realizadas via método de elementos finitos permitiram ainda a quantificação de esforços nas estacas — incluindo momentos fletores, forças cortantes e deslocamentos — os quais se mantiveram dentro dos limites admissíveis previstos para a solução adotada.

Cabe destacar a importância da abordagem integrada entre as análises geotécnicas e estruturais para a compreensão do comportamento global do sistema reforçado. As análises geotécnicas permitiram avaliar a interação entre o maciço e os elementos de contenção, enquanto as análises estruturais forneceram subsídios para o dimensionamento seguro das estacas.

Dessa forma, os resultados obtidos atestam a viabilidade técnica da solução de reforço proposta, evidenciando sua aplicabilidade como medida de segurança em processos de reabilitação e descaracterização de barragens de rejeito.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se a modelagem tridimensional para proposições de otimizações, de modo a representar de forma mais fidedigna o efeito de arqueamento das tensões com a inclusão de um elemento rígido na estrutura.

Outro ponto que poderá ser avaliado, é o acompanhamento de uma execução de estacas pela metodologia press in, de modo a avaliar os efeitos de propagação de ondas (vibrações) e seus efeitos na piezometria da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 13028:2024**. Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos de mineração. Rio de Janeiro, 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 13**, de 8 de agosto de 2019. Dispõe sobre critérios para elaboração e apresentação do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 153, p. 69, 9 ago. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 130**, de 13 de julho de 2023. Dispõe sobre os requisitos técnicos para declaração de condição de estabilidade de barragens de mineração. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 134, p. 70, 14 jul. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 175**, de 7 de fevereiro de 2024. Estabelece critérios para descaracterização de barragens construídas ou alteadas pelo método a montante. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 27, p. 78, 8 fev. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 4**, de 15 de fevereiro de 2019. Estabelece disposições complementares à Portaria nº 70.389/2017, que trata da segurança de barragens de mineração. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 33, p. 70, 18 fev. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 95**, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **VI Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração – RSBM 2024**. Brasília, DF: ANM, 2024. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/Publicacao/Visualizar/23247>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A572/A572M – 18: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- ANANTHANATHAN, P. et al. Behavior of laterally loaded piles. In: **Engineering jubilee congress—"engineering beyond 2000"**, vol. 1, Peradeniya, Sri Lanka, 2000. p. 103–106.
- BEER, F. P. et al. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. *Diário Oficial da União*, 21 set. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 30 jul. 2023.
- BRASIL. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Diário Oficial da União*, 30 set. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso em: 30 jul. 2023.
- BRITO, L. A. **Avaliação das principais fontes de vibração no meio urbano**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 233-249, 2014
- BS5228. **Part 4: Noise control on construction and open sites, code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations.** British Standards Institute, London. 1992

- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: vol. 2**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015.
- CHENG, XIAO-LING et al. **Finite element methods for Timoshenko beam, circular arch and Reissner-Mindlin plate problems**. Journal of Computational and Applied Mathematics, [S. l.], v. 79, p. 215-234, 17 mar. 1997
- CINTRA, J. C. Â. **Carregamento lateral em estacas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- CONEXÃO MINERAL. **Quatro barragens da Vale têm nível de emergência retirado e obtêm DCEs positivas**. 2023. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- DECKNER, F. **Ground vibrations due to pile and sheet pile**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2013.
- DOBRISAN, A.; HAIGH, S. K.; ISHIHARA, Y. Evaluating the efficiency of jacked-in piles as tsunami defences. In: **Proceedings of the first international conference on press-in engineering**, 2018.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3: Design of steel structures – Part 5: Piling**. EN 1993-5. Brussels: CEN, 2007.
- FERREIRA, J. M. C. **Vibrações induzidas pela cravação de estacas: análise e modelagem numérica**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Lisboa, 2015.
- GERSCOVICH, D.; DANZIGER, B. R.; SARAMAGO, R. **Contenções: teoria e aplicações em obra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- GIKEN. **Construction revolution**. Disponível em: <https://www.giken.com/en/>. Acesso em: 05 abr. 2025.
- GIKEN. **Silent piling technologies: Press-in method variations**. Ver. 2.4. International Business Department, 2015. 15 p.
- HIRATA, H. MATSUI, N. **Expanding Applications of the Gyropress Method™**. Nippon steel & Sumitomo metal technical report No. 113. 2016. 7p.
- INTERNATIONAL PRESS-IN ASSOCIATION (IPA). **Press-in retaining structures: a handbook**. 2. ed. [S. l.]: IPA, 2019. 392 p.
- ISHIHARA, Y.; HAIGH, S. Cambridge-Giken collaborative working on pile-soil interaction mechanisms. In: **Proceedings of the international conference on press-in engineering**, 2018. p. 23–46.
- JAPAN ROAD ASSOCIATION. **Diretrizes para o trabalho de terraplenagem de estradas e estabilização de taludes**. 1 jul. 2009. ISBN-10: 488950415X.
- MÁQUINA SOLO. **Martelos hidráulicos vibratórios ICE**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://maquinasolo.com.br/martelos-hidraulicos-vibratorios-ice/>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- MELLO, V. **Aplicações estacas tubulares**. Catálogo CONFAB, 1979.
- MELO, R. C. **Análise de estabilidade de barragens de rejeitos utilizando métodos numéricos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

OKAHARA, M.; TAKAGI, S. **Explanation of specifications of highway bridge part IV substructure, lateral resistance of elastic foundation.** *Civil Engineering Memorandum, Public Work Research Institute*, n. 32, p. 41–48, 1990.

PEREIRA, D. M. et al. **Introdução à terraplenagem.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006.

RANDOLPH, M. F. Design considerations for piles jacked or driven into strong soil or weak rock. In: **Proceedings of the second international conference on press-in engineering**, 2021, Kochi, Japão. CRC Press, 2021. p. 3.

RAUSCHE, F. Modeling of vibratory pile driving. **Proceedings of the international Conference on Vibratory.** Pile Driving and Deep Soil Compaction TRANSVIB 2002-Louvain-La Neuve, 21-32; 2002.

RESENDE, Paula Tannús. **Análise numérica da estabilidade de taludes empregando estacas como elemento de reforço.** 2021. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021

ROCSCIENCE. **Manual RS2.** Disponível em: <https://www.rocscience.com/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SANTOS, G. O. F.; FUTAI, M. M. Avaliação de critérios de deformabilidade para estruturas de contenção a jusante compostas por estacas tubulares. In: **Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas**, 2021.

SILVA, L. C. N. **Barragens de rejeito da mineração: análise do sistema de gestão do Estado de Minas Gerais.** Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2018.

TEHRANI, F. S. et al. **Comparison of Press-Replace Method and Material Point Method for analysis of jacked piles.** *Computers and Geotechnics*, [S.l.], v. 78, p.38-53. 2016.

TENGELE ENGENHARIA. **Cravação de estacas por percussão.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://tengel.com.br/cravacao-de-estacas-por-percussao>. Acesso em: 6 abr. 2025.

VALE. **Obras de reforço na Barragem 7, em Jeceaba.** 2023. Disponível em: <https://vale.com>. Acesso em: 6 abr. 2025.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R.– **Fundações**, V.2. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VIEL, I. N. **Uso de estacas metálicas tubulares em estruturas de proteção de barragens de rejeito de mineração.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

ZICCARELLI, M.; VALORE, C.; LISI, L. Ko **Evaluation in a Normally Consolidated Sand under High Effective Stress.** *Geosciences*, [S. l.], v. 14, n. 10, p. 264, 2024. DOI: 10.3390/geosciences14100264

WHITE, D., FINLAY, T., BOLTON, M., & BEARSS, G. **Press-in piling: Ground vibration and noise during pile installation.** In M. W. O'Neill, & F. C. Townsend (Eds.), *Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction and Performance* (Orlando, Florida, USA ed., Vol. 1, pp. 363-371). American Society of Civil Engineers. 2002.

YOSHIDA, I.; ADACHI, Y. **Experimental studies on statistical lateral restraint of caisson foundation.** *Civil Engineering Memorandum, Public Work Research Institute*, n. 139, p. 1–60, 1970.