

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/167

Análise Numérica de Contenção em Estacas Pranchas Metálicas de Cais de Porto

Thaís Ramos Souza

Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Brasil, thaisramos@ufmg.br

Talita Caroline Miranda

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia de Transporte e Geotecnia, UFMG, Belo Horizonte, Brasil talita@etg.ufmg.br

Pedro Feldmann Tonelli

Graduando de Geologia, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, pedrofeldmann00@ufmg.br

RESUMO: Em geral, os engenheiros geotécnicos trabalham com informação limitada que tenta representar uma realidade inacessível, e geralmente complexa, que pode mudar surpreendentemente em curtas distâncias (Mata, 2019). Uma forma considerada mais representativa é a análise numérica, que abdica de certas simplificações em virtude do desenvolvimento computacional. Desta forma, este estudo apresenta o desenvolvimento da modelagem numérica, em elementos finitos, de uma parede de cais de porto utilizando perfis de estacas pranchas metálicas laminados a quente. Para tal, foi analisado um projeto conceitual de cais de berço aberto com uma solução em parede dupla que consiste em uma parede principal e uma parede de ancoragem ligadas por um tirante. Após a modelagem, a solução final foi a parede principal em perfis AZ 26-700 com 23 m e grau S355GP e a parede de ancoragem em perfis GU 8N com 7 m e grau S430GP. As cortinas, que estão distantes 20 m em planta, são interligadas por um sistema de tirantes dispostos de metro a metro ao longo do perímetro. Portanto, o objetivo deste trabalho foi atingido por meio do modelo desenvolvido e se pode perceber que uma modelagem numérica representativa só é de fato alcançada em locais com alto grau de investigação, incluindo ensaios dilatométricos e de laboratório além dos corriqueiros ensaios a percussão.

PALAVRAS-CHAVE: Contenções, Estruturas Portuárias, Estacas Pranchas, Elementos Finitos.

ABSTRACT: In general, geotechnical engineers work with limited information that tries to represent an inaccessible and often complex reality that can change surprisingly over short distances (MATA, 2019). A form considered more representative is numerical analysis, which forgoes certain simplifications due to computational development. Thus, this study presents the development of the numerical modeling, in finite elements, of a port quay wall using hot-rolled metal sheet pile profiles. To this end, a conceptual open berth quay project was analyzed with a double wall solution consisting of a main wall and an anchor wall connected by a tie rod. After modeling, the final solution was the main wall in AZ 26-700 profiles with 23 m and grade S355GP and the anchor wall in GU 8N profiles with 7 m and grade S430GP. The curtain walls, which are 20 m apart in plan, are interconnected by a system of tie rods arranged meter by meter along the perimeter. Therefore, the objective of this work was achieved through the model developed and it can be seen that representative numerical modeling is only really achieved on sites with a high degree of investigation, including dilatometric and laboratory tests in addition to the usual percussion tests.

KEYWORDS: Restraints, Port Structures, Sheet piles, Finite Elements.

1 INTRODUÇÃO

As estacas pranchas metálicas laminadas a quente são utilizadas em obras de contenção temporárias e em estruturas permanentes. As seções são projetadas para fornecer a máxima resistência e durabilidade com o menor peso possível, conjuntamente com boas qualidades de cravação. O *design* dos conectores facilita o

içamento, bem como a cravação e resulta em uma parede contínua com uma série de conexões muito bem ajustadas. São um material pré-fabricado com alto controle de qualidade, devidamente ensaiado quanto sua resistência e durabilidade. Uma de suas aplicações mais comuns é para construção de paredes de cais de porto, pois configuram uma alternativa mais ágil e segura, o que muitas vezes leva a ser a solução com o melhor custo-benefício. Além disso, essa solução pode ser projetada para atender elevadas cargas axiais e grandes momentos fletores exigidos neste tipo de obra (ArcelorMittal, 2016).

O estudo de problemas com carácter geotécnico é geralmente feito de forma simplificada, em uma análise em que se considera o solo homogêneo isotrópico, com comportamento elástico linear. Apesar do comportamento complexo de campo traduzido fidedignamente por essas simplificações, as soluções obtidas constituem, em via de regra, uma primeira aproximação de grande utilidade prática. Com o progressivo desenvolvimento computacional, foram-se desenvolvendo poderosas técnicas numéricas que permitem resolver uma grande variedade de problemas geotécnicos. O Método dos Elementos Finitos (MEF), é um dos métodos de cálculo utilizados para a avaliação do comportamento da tensão e deformação do solo, como também para a compreensão da interação solo/estrutura. Além de fornecer a resposta do meio no domínio elasto-plástico, o MEF permite efetuar uma análise evolutiva da resposta do solo desde o início do carregamento até ao colapso, de forma representativa (Martins, 1988).

A solução em estacas pranchas metálicas constitui um cenário favorável para análise em elementos finitos da interação solo/estrutura, em primeira instância, pois possuem propriedades muito bem definidas, podendo, assim, facilitar o aprendizado do software e a interpretação dos resultados por profissionais com pouca experiência nesse tipo de modelagem. O presente estudo visa alinhar estes dois temas, analisando a interação solo/estrutura de um projeto genérico de contenção em estacas pranchas de cais de porto modelado no software de elementos finitos geotécnico PLAXIS 2D. Desta forma, o objetivo do trabalho é desenvolver um modelo numérico em elementos finitos para analisar o comportamento tensão/deformação para estruturas de contenções em estacas pranchas metálicas laminadas a quente de cais de porto.

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO CONCEITUAL

O cais de berço aberto se difere dos outros tipos de cais pois a diferença de altura não é superada por uma parede vertical, mas por um talude. A estrutura é constituída por um tabuleiro paralelo à costa, necessariamente ancorado. O tabuleiro é implantado sobre estacas verticais e inclinadas. No talude sob o convés, o solo deve ser coberto por um revestimento, capaz de suportar as ações de correnteza e ondas. Estas estruturas são utilizadas principalmente quando: o processo construtivo ocorre acima do nível d'água; não há calado suficiente para as embarcações; existe um substrato relativamente pobre; e, já existem encostas protegidas. O litoral brasileiro, em geral, apresenta em sua litologia um solo de baixa capacidade até o afloramento rochoso. Sendo assim, o cais de berço aberto é uma das soluções viáveis para implantação e reforma de portos. Portanto, será estudado preliminarmente um caso conceitual deste tipo de cais.

2.1 Estratigrafia

Para o projeto genérico analisado, considera-se a remoção de todo o solo mole e execução de aterro controlado em formato de talude sobre rocha fraturada. Desta forma, o perfil estratigráfico será composto por duas camadas, a primeira de **aterro convencional de areia média** e a segunda de **rocha muito fraturada**. Para estimar os parâmetros das camadas o ideal é ter os ensaios de campo e laboratório a disposição, porém, por se tratar de um projeto conceitual, serão tomados parâmetros conforme Bianco (2015). Os parâmetros de caracterização, deformabilidade e resistência adotados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos do caso estudado.

Camada/ Parâmetros	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	δ (°)	E (MPa)	ν	G (MPa)	Ψ (°)
Aterro	18	30	0	10	20	0,20	8,33	0
Rocha	26	40	10	13,33	1250	0,35	463	0

2.2 Parâmetros Estruturais

Para situações de aterro, uma solução interessante é a de parede dupla em estacas pranchas metálicas. Essa solução consiste em uma parede principal e uma parede de ancoragem ligadas por um tirante. É uma opção interessante para o caso em questão já que a parede de ancoragem fica completamente aterrada, o que é compatível com o processo executivo de um aterro controlado. Sendo assim, propõe-se este tipo de estrutura para o estudo de caso conceitual deste relatório.

O comprimento da parede principal foi baseado em embutimento de um metro em rocha. Assim, o comprimento final das estacas pranchas da parede principal ficará em torno de 23 metros. Para esta situação será empregado perfil AZ 26-700 duplo da ArcelorMittal. Por estar confinada no aterro, em geral, a parede de ancoragem está sujeita a menores solicitações que a parede principal, o que as condicionam um menor comprimento. Desta forma, serão adotados os parâmetros estruturais das estacas GU 8N. O grau do aço das estacas deve ser definido na verificação estrutural. Como as estacas pranchas são estruturas pré-fabricadas com alto controle de qualidade, seus parâmetros estruturais são catalogados e para cada parede os parâmetros utilizados estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros estruturais do caso estudado (ArcelorMittal, adaptado, 2021).

Perfil	B _{sys} (m)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	W (kg/m)	E (kN/m ²)	ν	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	w (kN/m/m)
AZ 26-700d	1,40	262,1	83610	205,7	2,00E+08	0,30	3,74E+06	1,19E+05	1,469
GU 8Ns	0,60	61,8	2420	48,5			2,06E+06	8,07E+04	0,808
Tirante	-	-	-	-			2,00E+05		

Além da verificação local e estrutural da solução, investigando quais solicitações as estacas estarão sujeitas e se às resistem, é essencial analisar a estabilidade global da solução. O PLAXIS é uma ótima ferramenta nesse sentido, pois faz as duas análises em uma mesma modelagem. É por meio da verificação da estabilidade global que se obtém as distâncias entre as paredes e o comprimento dos tirantes. Como ponto de partida foi tomada uma distância de dez metros entre as paredes. Os parâmetros dos tirantes foram tomados como o padrão *Lesson 6 - Anchor* do PLAXIS 2D.

2.3 Ações em Estruturas Portuárias

São diversos os carregamentos a serem considerados em uma estrutura portuária, marítima ou fluvial como o peso próprio, cargas verticais e de equipamentos, carga de amarração e atracação, os empuxos do maciço, as correntes marítimas, a ação de ventos e ondas, ações sísmicas, ações de gelo e degelo, entre outras. As ações que devem ser incluídas em uma parede de cais dependem de onde este será implantado. No Brasil, por exemplo, não ocorrem eventos sísmicos e variação térmica significativos, portanto, essas ações podem ser desprezadas. A Norma ABNT NBR-9782 (1987) dispunha a respeito de valores representativos de ações que devem ser consideradas no projeto de estruturas portuárias, aplicados a estruturas de abrigo e acostagem. Porém, esta norma foi cancelada e ainda não foi disponibilizada atualização.

Para contornar este obstáculo, Bianco (2015) comparou os valores da antiga NBR 9782 (1987) com os das respectivas normas americana e europeia. Sendo assim, estimou-se as ações atuante na parede com base principalmente na NBR 9782 ponderando com os valores apresentados nas normas internacionais. As ações serão combinadas de diferentes formas nas fases de cálculo de forma a se obter uma combinação crítica e não serão adotados coeficientes de combinação pela norma já apresentar valores conservadores e se tratar de uma análise preliminar. A Figura 1 apresenta o modelo geotécnico geral deste projeto conceitual de cais de porto, com o perfil estratigráfico, a esquematização da estrutura e as cargas externas atuantes.

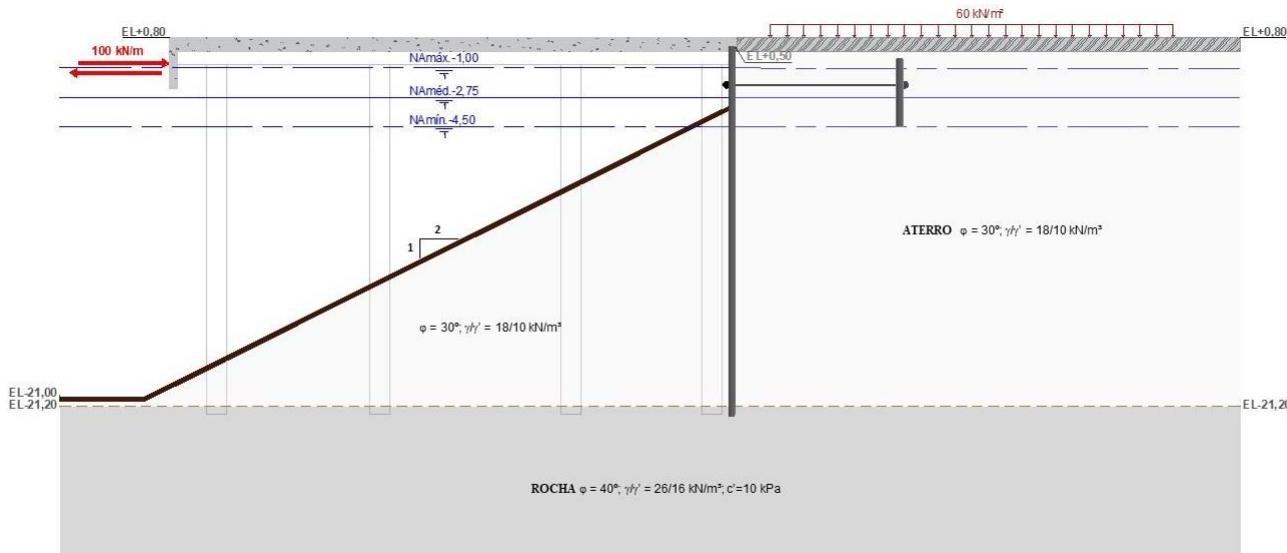


Figura 1. Modelo geotécnico de caso conceitual de cais de berço aberto (Autora, 2022).

3 METODOLOGIA

A primeira etapa consistiu em entender os elementos e conceitos associados a modelagem numérica proposta. Isto foi percebido por meio da revisão bibliográfica e da experiência prática da autora com este tipo de estrutura. Após esta etapa foi feita uma descrição do projeto conceitual contendo as variáveis que compõem a modelagem. A modelagem da seção transversal típica foi realizada em caráter preliminar, através do software PLAXIS 2D da Bentley Systems. O PLAXIS 2D é um software de elementos finitos voltado especialmente para estudos geotécnicos em um plano bidimensional, utilizado para realizar análises de deformação e estabilidade para vários tipos de aplicações geotécnicas. Uma das grandes vantagens da aplicação do método dos elementos finitos é não necessitar de simplificações metodológicas para simular a situação em campo. Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotado o modelo constitutivo elasto-plástico em detrimento das simplificações propostas do modelo elástico, pois melhor representa o comportamento dos materiais envolvidos no problema. Como critério de ruptura foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb, embora sua natureza conservadora, por se tratar de uma análise conceitual e preliminar.

A análise numérica foi feita em etapas possibilitando a simulação da cronologia de execução da obra. Ao todo, a modelagem possui seis fases além da fase inicial que conta apenas com a camada de rocha, que serão analisadas para cada uma das condições de nível d'água apresentadas. Desta maneira, cada etapa está descrita a seguir:

0. Dragagem do solo de baixa resistência;

1. Instalação das estacas pranchas da parede principal na EL+0,80, bem como aterro em areia média atrás da cortina e em frente a cortina em talude até a EL+3,30;
2. Instalação das estacas pranchas da parede de ancoragem na EL-1,00 e instalação dos tirantes de ligação com espaçamento de 1 m;
3. Aterro atrás da cortina até a EL+0,80;
4. Sobrecarga de 60 kN/m² aplicada atrás da cortina;
5. Carga de atracação no topo da parede principal de 100 kN/m;
6. Carga de amarração no topo da parede principal de 100 kN/m.

Por se tratar de um projeto conceitual, a seção transversal típica foi discretizada em uma malha triangular média representada na Figura 2. Como a solução em elementos finitos aponta as tensões e deformações no nó, quanto maior a quantidade de informações sobre a obra e mais representativa for a modelagem, mais fina a malha poderá ser. Os resultados esperados estão relacionados ao dimensionamento preliminar ótimo da

parede de contenção principal do cais. Portanto, busca-se encontrar as fases críticas de construção no quesito de estabilidade global e local, momentos, forças axiais e deslocamentos máximos e em pontos específicos de interesse, carregamento nos sistemas de ancoragem e por fim, validar o perfil e solução de contenção adotados.

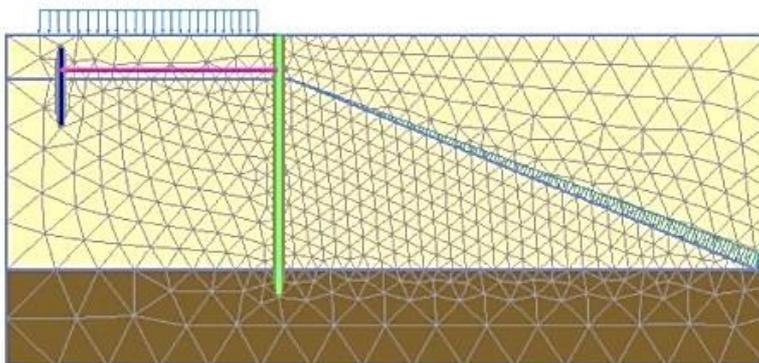


Figura 2. Malha triangular média (Autora, 2022).

4 RESULTADOS

Diversas são as informações que podem ser obtidas por meio da modelagem em elementos finitos. A Tabela 3 aponta o resumo dos esforços solicitantes máximos nas paredes para cada situação de nível d'água.

Tabela 3. Resultados extremos de cálculo.

Parede	Condição hidráulica	$ u _{\text{máx}}$ mm	$M_{\text{máx}}$ kN.m/m	$Q_{\text{máx}}$ kN/m	$N_{\text{máx}}$ kN/m
Principal	NAméd	89,1	-370,1	-144,6	-181,2
	NAmáx	84,5	-368,2	-138,8	-180,1
	NAmín	88,9	-369,2	-144,0	-175,8
Ancoragem	NAméd	85,5	151,1	-135,9	-96,3
	NAmáx	73,7	144,2	129,4	-83,2
	NAmín	86,7	151,1	136,5	-101,3

Para a parede principal, a situação crítica foi o nível d'água médio, porém como a diferença é muito sutil entre as variações, esta é uma informação que não é possível afirmar. A parede de ancoragem apresentou uma diferença ligeiramente maior com relação à variação do nível d'água, tendo o nível d'água mínimo como crítico. O comprimento final das cortinas foi de 24 m para a principal, sendo 23 m de estaca prancha AZ 26-700 e 1 m de viga de coroamento, e de 7 m de estaca GU 8N para a parede de ancoragem. Os tirantes estão sujeitos à esforços axiais e deverão ser dimensionados para uma carga de 267 kN, estando posicionados metro a metro.

4.1 Verificação de Estabilidade Global

As deformações totais pela análise de plasticidade e de segurança podem ser observadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente, para o caso crítico de nível d'água médio. Analisando a Figura 3 é possível notar a maior concentração de deformações e tensões no topo da parede principal. Imaginando a estaca como uma viga, esta estaria biapoiada pelo início da ficha e pelo tirante e em balanço do tirante até o topo. Desta forma, a maior carga estaria sendo aplicada no final do balanço. Como a maior carga está aplicada no final do balanço da estaca é nele que ocorre o maior deslocamento, justificando a concentração de deformações próximas ao topo.

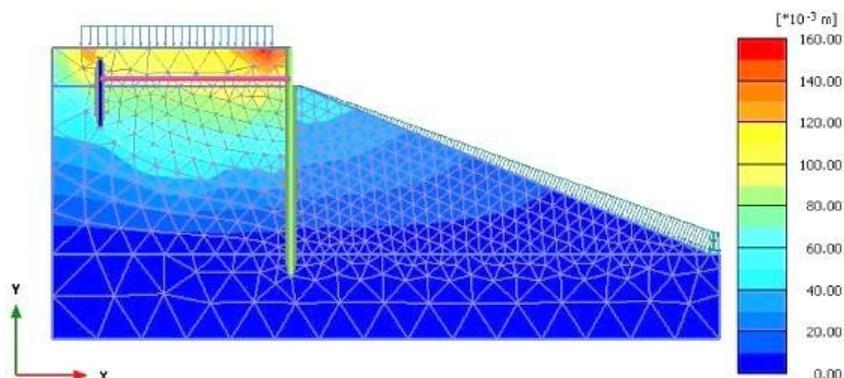


Figura 3: Deformações totais local para NAMéd.

Por meio da Figura 4, é possível observar a cunha de ruptura do talude em frente a cortina, situação que pode ser facilmente solucionada com uma proteção em enrocamento, que ajudaria também na proteção contra erosão, além de aumentar a estabilidade. Analisando de forma global, esta cunha atuando mais incisivamente no talude faz jus a solução proposta, já que a parede dupla é suficiente para suportar aos empuxos ativos do vão livre sobrepondo o talude como empuxo passivo, sobrecarregando a região. O fator de segurança de estabilidade global está próximo a 1,50 conforme apresentado pela Figura 5, e o enrocamento proposto limitaria as deformações no talude e aumentaria o empuxo passivo, consequentemente fornecendo mais estabilidade à solução. Para obter uma solução estável pelo critério de fator de segurança mínimo de 1,50, foi necessária uma distância de 20 metros entre as cortinas.

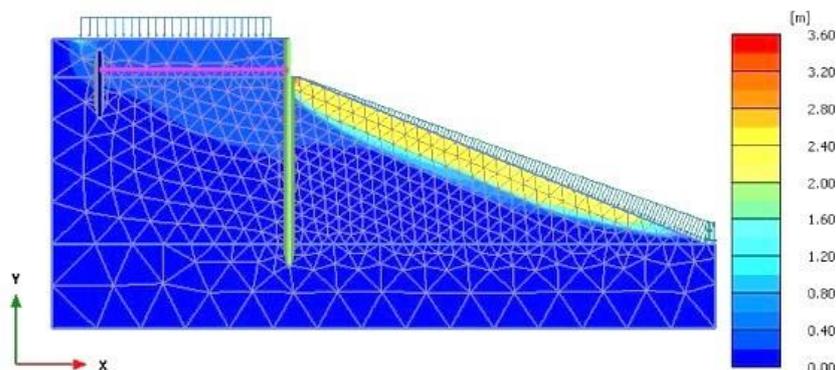


Figura 4: Cunha de estabilidade global para NAMéd.

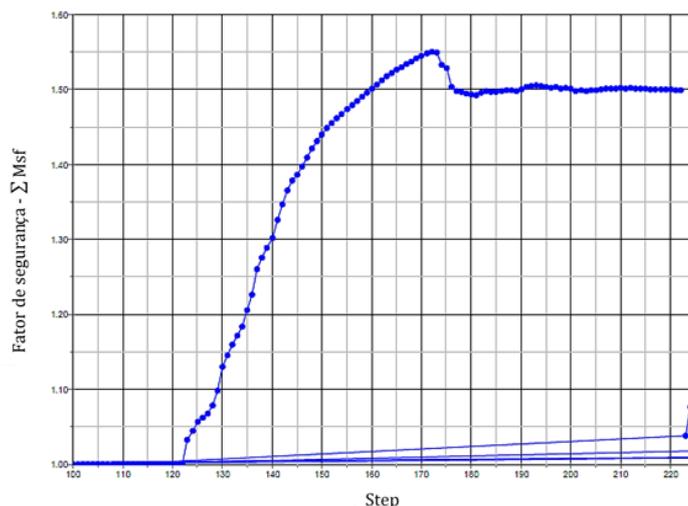


Figura 5: Fator de segurança para NAMéd.

4.2 Verificação Estrutural das Estacas Pranchas

Por fim, é necessário realizar a verificação estrutural dos perfis para analisar se as opções escolhidas formam uma solução estruturalmente segura. Para tal, os esforços solicitantes máximos resumidos na Tabela 6 foram utilizados para análise no *software* gratuito Durability da ArcelorMittal com vida útil de 50 anos.

Tabela 6. Esforços solicitantes máximos.

Parede	M _{máx} kN.m/m	N _{máx} kN/m	u _{máx} mm
Principal	370,1	-181,2	89,1
Ancoragem	151,1	-101,3	86,7

Na parede principal, optou-se por estacas AZ 26-700 que se encontra em contato com ambiente marinho de alto ataque na face frontal e com aterro compactado não agressivo na outra face. Para essa situação de ambiente corrosivo e esforços solicitantes foi suficiente o grau de aço S355GP resultando um fator de segurança reduzido de 1,57. Na parede de ancoragem, utilizou-se estacas GU 8N que está em contato com aterro compactado não agressivo em ambas as faces. Para essa situação teve de ser adotado um grau maior, S430GP, resultando um fator de segurança reduzido de 1,65. Portanto, teve-se um dimensionamento ótimo da solução conciliando a disponibilidade de material e as exigências técnicas da solução.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise numérica de elementos finitos na geotecnia é baseada na integração e interação entre o comportamento do solo e da estrutura. Através desta análise foram obtidas tensões e deformações do solo e da estrutura e de acordo com a rigidez de cada elemento são determinadas as forças internas. O presente trabalho analisou numericamente um projeto conceitual de cais de berço aberto em perfis de estacas pranchas laminadas a quente. A modelagem foi realizada por meio do *software* de elementos finitos geotécnico PLAXIS 2D.

Os parâmetros geotécnicos estimados tiveram como base uma areia média para a camada de aterro e uma rocha fraturada para o maciço rochoso. As etapas executivas da obra tiveram como condição inicial a dragagem do solo de baixa capacidade e exposição da face rochosa. Em seguida, modelou-se a solução propriamente dita com a instalação da parede principal, execução do aterro até 0.5 m abaixo do tirante, instalação da parede de ancoragem e dos tirantes e aterro final. Por fim, teve-se a inclusão da sobrecarga e das cargas de atracação e amarração, respectivamente, em diferentes fases.

A solução final da modelagem consiste em um sistema de parede dupla ligadas por tirantes dispostos metro a metro. A parede principal consiste em perfis de estacas pranchas metálicas AZ 26-700 duplos grau S355GP com 23 m e uma viga de coroamento de 1 m. A parede de ancoragem é dada em perfis GU 8N simples grau S430GP com 7 m de comprimento. As cortinas, que estão distantes 20 m em planta, são interligadas por um sistema de tirantes que devem ser dimensionados por um engenheiro estrutural para um carregamento axial de 267 kN, a ser adequadamente majorado pelos coeficientes de ações.

Um ponto de destaque nos resultados é a pequena diversidade entre os esforços atuantes na parede principal, em diferentes condições hidráulicas (conforme Tabela 3). Essa questão pode ter sido desencadeada pela falta na precisão de informações e consequente espessura da malha, dado que foi analisado um projeto conceitual, porém é um excelente exemplo de como se deve usar uma análise rica como a de elementos finitos, com abundância de informações. Uma boa modelagem numérica só é alcançada em locais com alto grau de investigação, incluindo ensaios dilatométricos e de laboratório, além dos corriqueiros ensaios à percussão. A investigação incisiva pode levar não só a uma redução nos custos de operação, prevendo possíveis adversidades, como também uma maior garantia de segurança da estrutura geotécnica.

Diversas ferramentas disponíveis no PLAXIS 2D não foram utilizadas pelo objetivo fim deste trabalho e ficam como sugestões para atividades em futuros trabalhos, pois, algumas delas fornecem informações relevantes para as análises geotécnicas. Um exemplo disso é a verificação que pode ser feita em nós específicos em pontos críticos do projeto. Além disso, o fluxo d' água é uma variável significativa em projetos geotécnicos e sua análise deve ser viabilizada em modelagens futuras, já que está à disposição do *software* utilizado.

Dado o exposto, nota-se que os objetivos desta monografia foram atingidos consolidando uma modelagem bem embasada e um dimensionamento otimizado. Por último, o conhecimento de elementos finitos

aplicado à geotecnia é um diferencial na área e a execução de uma modelagem bem estruturada durante a graduação abre excelentes portas no mercado para futuros engenheiros geotécnicos, assim, a comunidade acadêmica tem o importante papel de instigar, incentivar e promover estudos relacionados a este tema.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Elvadina e Edilson, por terem tratado a educação como prioridade na minha criação, dedicando boa parte de seu tempo e recurso para me incentivar a ser a melhor pessoa e profissional que eu poderia ser. Aos meus avós, que criaram seus filhos com a mentalidade de que a educação é o melhor caminho a ser seguido, mesmo não tendo tido a mesma oportunidade. A toda minha família por sempre terem me encorajado e pelos calorosos comentários orgulhosos a cada conquista, eles foram combustíveis para enfrentar por cada obstáculo. E por fim, agradeço a mim, por me manter firme e concentrada nos meus objetivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1987) *NBR 9782: Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas e Fluviais*. Rio de Janeiro, p. 27.
- Arcelormittal Commercial (2021) RPS, *Steel Foundation Solutions: General Catalogue 2021*. 11.2020. ed. Luxemburgo: FSC paper, 2021. 64 p. v. único.
- Arcelormittal Commercial (2016) RPS, *Piling Handbook*. 9ª. ed. Luxemburgo: Imprimerie Centrale. 455 p. v. único. ISBN 9789995901943.
- Bianco, L. P. O. (2015) *Critérios de projeto em obras portuárias: uma comparação entre normas brasileira e estrangeiras*. Orientador: Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho. 2015. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Martins, F. F. (1998) *Aplicação de elementos finitos e infinitos na análise de problemas de caráter geotécnico*. Porto: FEUP. 195 p.
- Mata, P. P. et al. (2019) *BIM – GGIM: Conceitos e aplicações na geotecnia*. Lisboa, p. 10.