

**FELIPE MOSCHEM DE NADAI  
MARINA CARVALHO SAMUEL  
MURILO SCHMIDT OLIVEIRA SOTO  
SAMUEL JOAQUIM REZENDE LIMA**

**USO DA TÉCNICA DE *JET-GROUTING* ARMADO PARA  
AUMENTO DE CALADO DE CAIS PORTUÁRIO**

Trabalho de Formatura do Curso de  
Engenharia Civil apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo

São Paulo  
2016

**FELIPE MOSCHEM DE NADAI  
MARINA CARVALHO SAMUEL  
MURILO SCHMIDT OLIVEIRA SOTO  
SAMUEL JOAQUIM REZENDE LIMA**

**USO DA TÉCNICA DE *JET-GROUTING* ARMADO PARA  
AUMENTO DE CALADO DE CAIS PORTUÁRIO**

Trabalho de Formatura do Curso de  
Engenharia Civil apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio  
Medeiros Marinho

São Paulo  
2016

Uso da técnica de *jet-grouting* armado para aumento de calado  
de cais portuário / F. M. de Nadai, M. C. Samuel, M. S. O. Soto,  
S. J. R. Lima... [et al.]. – São Paulo, 2016. – 103 páginas f.

Trabalho de conclusão de curso – Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo. Curso de Engenharia Civil

Orientador: Fernando Antônio Medeiros Marinho  
1. Aumento de calado 2. *Jet-grouting* 3. Engenharia civil  
I. Nadai, Felipe Moschem de II. Samuel, Marina Carvalho III.  
Soto, Murilo Schmidt Oliveira IV. Lima, Samuel Joaquim  
Rezende

## AGRADECIMENTOS

Felipe Moschem De Nadai

Agradeço a meus pais, Natalicio e Goreti, por terem me dado todo o suporte familiar necessário para que eu buscassem minha realização pessoal e acadêmica de forma plena. Agradeço também à coletividade paulista por financiar meus estudos universitários sem requerer contrapartida alguma.

Marina Carvalho Samuel

Agradeço aos meus pais, Angela e Osmar, e ao meu irmão Rodrigo, pelo amor, apoio e incentivo incondicional.

Murilo Schmidt Oliveira Soto

Agradeço primeiramente aos meus pais, José Luiz e Elisabete, que se empenharam arduamente em me proporcionar a melhor educação possível, principalmente os ensinamentos morais da ética e conduta ilibada.

Aos meus irmãos, Rafael e Julia, que estão sempre ao meu lado, sendo meus exemplos em muitas decisões.

Samuel Joaquim Rezende Lima

Gostaria de agradecer todo o suporte e apoio que meus pais, Elias e Leda Maria, assim como a minha vó Olinda, me propiciaram durante a faculdade. Ao meu irmão Rafael e a minha namorada Cristina por toda a fé que têm em mim e a meus amigos que foram de grande importância durante todo esse tempo na faculdade.

O grupo agradece aos professores Fernando Marinho e Kalil Skaf pela orientação.

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	Objetivos .....	2
2.1	Objetivos Gerais.....	2
2.2	Objetivos Específicos .....	2
3	Justificativa.....	3
3.1	Contextualização.....	3
3.2	Operação do Canal do Panamá.....	4
3.3	Expansão do Canal do Panamá.....	5
4	Metodologia.....	8
5	Técnica de <i>jet-grouting</i> .....	9
5.1	Introdução .....	9
5.2	<i>Jet-grouting</i> convencional .....	9
5.2.1	Equipamentos.....	9
5.2.2	Aplicações .....	12
5.2.3	Etapas do processo construtivo.....	12
5.2.4	Especificações.....	14
5.3	<i>Jet-grouting</i> armado .....	17
5.3.1	Equipamentos.....	17
5.3.2	Aplicações .....	18
5.3.3	Processo construtivo .....	20
5.3.4	Especificações.....	20
5.4	<i>Jet-grouting</i> armado submerso .....	21
5.4.1	Equipamentos.....	21
5.4.2	Aplicações .....	22
5.4.3	Processo construtivo .....	22
6	Aspectos físicos a serem considerados .....	23
6.1	Estabilidade local .....	23
6.2	Estabilidade global .....	23
6.3	Conexão prancha-tabuleiro .....	23
6.4	Fluidificação do solo argiloso .....	23
6.5	Tirante .....	24
6.5.1	Exequibilidade em função da modulação do estaqueamento existente	24
6.5.2	Ancoragem (eventual) em argila mole .....	24
6.5.3	Problema de atirantamento em estaca-prancha .....	25
6.6	Levantamento de fundo de canal devido ao uso de <i>jet-grouting</i> .....	25
6.7	Problemas associados ao aprofundamento do cais portuário.....	26
6.7.1	Aumento das forças de atracação/amarração .....	26
6.7.2	Aumento da sobrecarga na retroárea .....	26
6.7.3	Troca de equipamentos do cais portuário.....	26
6.8	Mudança no andamento dos esforços no maciço de solo.....	27
6.9	Conexão prancha-coluna <i>jet-grouting</i> ( <i>tension cut-off</i> ).....	27
7	Análise ambiental .....	28
7.1	Explicação e importância .....	28
7.2	Metodologia.....	28
8	Estudos de caso.....	33
8.1	Porto de Navegantes, Santa Catarina.....	33

8.2	Porto de Ravenna, Itália.....	37
8.2.1	Contexto .....	37
8.2.2	O teste em escala real.....	38
8.2.3	Obra de reforço do paramento do cais portuário .....	42
9	Análise tensão-deformação da utilização de <i>jet-grouting</i> armado.....	45
9.1	Estrutura atual do cais do Porto de Navegantes .....	45
9.2	Caracterização do solo local .....	48
9.3	Solicitações ao cais portuário.....	50
9.4	Modelo em solo arenoso .....	51
9.4.1	Sem intervenção.....	51
9.4.2	Somente intervenção vertical: colunas de <i>jet-grouting</i> armado .....	56
9.4.3	Somente intervenção horizontal: tirante miniJET® .....	58
9.4.1	Intervenção mista: colunas de <i>jet-grouting</i> e tirantes miniJET® .....	60
9.5	Modelo em solo argiloso .....	62
9.5.1	Sem intervenção.....	62
9.5.2	Somente intervenção vertical: colunas de <i>jet-grouting</i> armado .....	66
9.5.3	Somente intervenção horizontal: tirante miniJet® .....	69
9.5.4	Intervenção mista: colunas de <i>jet-grouting</i> e tirantes miniJET® .....	71
9.6	Medidas corretivas .....	73
10	Conclusão .....	74
	Referências Bibliográficas .....	76

## RESUMO

A ampliação do Canal do Panamá afetará frontalmente a logística Atlântico/Pacífico devido aos efeitos da redistribuição das principais rotas marítimas mundiais. Além disso, haverá um forte impacto na demanda por infraestrutura nos terminais portuários localizados no continente americano.

No Brasil, os escassos investimentos na gestão portuária, aliados às influências da navegação internacional, impõem significativa pressão para que navios maiores sejam autorizados a utilizar os canais de acesso e os cais já existentes.

Para isso, será estudada uma técnica que permite o aumento do calado de cais portuário, o *jet-grouting* armado, técnica esta que já foi utilizada nos portos de Ravena, na Itália, e de Navegantes, em Santa Catarina, elucidados neste trabalho. Também serão abordados aspectos físicos relacionados ao uso dessa técnica como reforço em estruturas portuárias, com foco no caso do Porto de Navegantes, principalmente os aspectos relacionados ao impacto ambiental.

Por fim, será analisada a proposta de rebaixamento do calado no Porto de Navegantes, utilizando a técnica de *jet-grouting* armado para reforçar a estrutura do cais, por meio de uma análise de tensão-deformação simulada com o software Plaxis Introductory®.

Palavras-chave: Aumento de calado; *jet-grouting*; engenharia civil.

## ABSTRACT

The expansion of the Panama Canal frontally affects the Atlantic/Pacific logistics due to the effects on the redistribution of the leading global shipping routes. In addition, there will be a strong impact on demand for infrastructure in port terminals located in the Americas.

In Brazil, few investments in port management, coupled with the influences of international shipping, impose significant pressure on larger vessels to use the access channels and the existing piers.

Therefore, it will be studied a technique called jet-grouting for reinforcement of port structures, which has been used in Ravenna, Italy, and at the port of Navegantes, Brazil. These two cases will also be elucidated in this work. Physical aspects related to the use of this technique as reinforcement in port structures will also be approached, focusing on the case of the port of Navegantes, especially aspects related to environmental impact.

Finally, the proposal draft depth increasing at the port of Navegantes will be analyzed, using the jet-grouting technique to reinforce the structure of the quay, through a simulated stress-strain analysis by the software Plaxis Introductory®.

Key-words: Draft depth increase; jet-grouting; civil engineering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Andamento das obras em 11 de outubro de 1913. ....	4
Figura 2 - Ilustração do trajeto percorrido pelos navios que cruzam o Canal do Panamá.....	5
Figura 3 - Configuração do Canal do Panamá após a expansão. ....	6
Figura 4 – Comparação entre as dimensões de navios das gerações <i>Panamax</i> e <i>Post-Panamax</i> . ....	7
Figura 5 - Perfuratriz de haste simples. ....	10
Figura 6 - Perfuratriz de haste quádrupla. ....	11
Figura 7 - Utilização do <i>jet-grouting</i> convencional para consolidação vertical de abóbadas de túneis. ....	12
Figura 8 - Confecção de colunas de <i>jet-grouting</i> convencional. ....	13
Figura 9 - Adesão entre colunas de <i>jet-grouting</i> . ....	14
Figura 10 - Interação jato-solo. ....	15
Figura 11 - Seção longitudinal típica da montagem para execução do <i>jet-grouting</i> armado. ....	17
Figura 12 - Detalhe da ferramenta de corte dotada de bicos injetores e proteção anticorrosiva. ....	18
Figura 13 - <i>Jet-grouting</i> armado como contenção lateral e de fundo em Guarujá (SP). ....	18
Figura 14 - Tirantes protendidos sub-horizontais para muros de contenção. ....	19
Figura 15 - Tratamento de encostas e taludes instáveis. ....	19
Figura 16 - Fases da execução - "jetting in". ....	20
Figura 17 - Equipamento para a execução de tirantes submersos. ....	21
Figura 18 - Perfuração e injeção de <i>jet-grouting</i> armado submerso. ....	22
Figura 19 – Rede de interação. ....	30
Figura 20 - Colunas de <i>jet-grouting</i> armado sendo realizadas no retroporto em Navegantes. ....	33
Figura 21 - Colunas de <i>jet-grouting</i> armado sendo realizadas no retroporto em Navegantes. ....	34
Figura 22 – Estacas testes de <i>jet-grouting</i> armado no Porto de Navegantes. ....	35
Figura 23 – Exumação das estacas testes, realizadas no retroporto de Navegantes. ....	35
Figura 24 - Resultado gráfico das provas de compressão das colunas de <i>jet-grouting</i> armado da obra no Porto de Navegantes. ....	36
Figura 25 - Resultado gráfico das provas de tração das colunas de <i>jet-grouting</i> armado da obra no Porto de Navegantes. ....	37
Figura 26 - Localização do campo de prova no Porto de Ravena. ....	38
Figura 27 - Imagem de satélite do campo de provas no Porto de Ravena. ....	39
Figura 28 - Célula perfuratriz utilizada para realizar os tirantes submersos de <i>jet-grouting</i> armado de prova. ....	40
Figura 29 - Realização dos tirantes submersos de <i>jet-grouting</i> armado de prova....	40
Figura 30 - Ilustração esquemática do macaqueamento hidráulico utilizado. ....	41
Figura 31 - Ensaio carga x deformação em um dos tirantes à cota -5,00 m. ....	42
Figura 32 - Ensaio carga x deformação em um dos tirantes à cota -8,00 m. ....	42
Figura 33 - Imagem de satélite do Porto de Ravena, com os cais do primeiro lote de obras de reforços destacados em vermelho. ....	43
Figura 34 - Seção transversal do cais do Porto de Navegantes. ....	46

Figura 35 - Perfil geotécnico do Porto de Navegantes.....	49
Figura 36 – Modelo em solo arenoso, calado de projeto, sem intervenção estrutural.....	52
Figura 37 - Deformações horizontais, momento e força cortante na estaca-prancha para calado de projeto e sem intervenção – solo arenoso.....	53
Figura 38 - Modelo em solo arenoso, calado futuro, sem intervenção estrutural.....	54
Figura 39 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha para calado futuro e sem intervenção – solo arenoso.....	55
Figura 40 - Modelo em solo arenoso com intervenção vertical.....	56
Figura 41 - Deslocamentos horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção vertical – solo arenoso.....	57
Figura 42 - Modelo em solo arenoso com intervenção horizontal.....	58
Figura 43 - Deslocamentos horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção horizontal – solo arenoso.....	59
Figura 44 - Modelo em solo arenoso com intervenção estrutural mista.....	60
Figura 45 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção mista – solo arenoso.....	61
Figura 46 - Modelo em solo argiloso, calado de projeto, sem intervenção estrutural.....	63
Figura 47 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha para calado de projeto e sem intervenção – solo argiloso.....	64
Figura 48 - Modelo em solo argiloso, calado futuro, sem intervenção estrutural.....	65
Figura 49 - Deformações horizontais, momentos e esforço cortante na estaca-prancha para calado futuro e sem intervenção – solo argiloso.....	66
Figura 50 – Modelo em solo argiloso com intervenção vertical.....	67
Figura 51 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção vertical – solo argiloso.....	68
Figura 52 - Modelo em solo argiloso com intervenção horizontal.....	69
Figura 53 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção horizontal – solo argiloso.....	70
Figura 54 - Modelo em solo argiloso com intervenção mista.....	71
Figura 55 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção mista – solo argiloso.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação do SPT de cada tipo de solo com o diâmetro das colunas de CCP.....	16
Tabela 2 - Correlação do SPT de cada tipo de solo com o diâmetro das colunas de JSG. ....	16
Tabela 3 - Propriedades da coluna de <i>jet-grouting</i> convencional.....	16
Tabela 4 - Estimativa do consumo de cimento de acordo com o tipo de solo.....	17
Tabela 5 - Quadro síntese de referência para caracterização de impactos ambientais.....	29
Tabela 6 - Fatores e pesos considerados. ....	30
Tabela 7 - Escala da magnitude de impacto. ....	31
Tabela 8 - Escala da reversibilidade do impacto. ....	31
Tabela 9 - Escala da probabilidade de ocorrência do evento.....	31
Tabela 10 - Matriz de impactos ambientais. ....	31
Tabela 11 - Descrição de execução do tirante em <i>jet-grouting</i> armado nº 276 do 1º lote do Porto de Ravenna.....	44
Tabela 12 - Características físicas e mecânicas do perfil AZ 26-700.....	48
Tabela 13 - Parâmetros de solo médio utilizados na análise em elementos finitos...	49

## LISTA DE SIGLAS

CCP	<i>Cement Churning Pile</i>
JSG	<i>Jumbo Special Grout</i>
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
UWA	<i>Under Water Anchor</i>

## 1 INTRODUÇÃO

A técnica de *jet-grouting* é aplicada na melhoria das propriedades dos solos, para contenções e reforços, inclusive em obras portuárias. Algumas das vantagens do *jet-grouting* são garantia de resistência, rapidez de execução e versatilidade. Além disso, a tecnologia é aplicável a qualquer tipo de solo, sem restrições granulométricas e as colunas podem ser feitas em quaisquer direções. No entanto, é uma tecnologia cara, pois seu custo costuma estar atrelado a um maior consumo de cimento e ao conjunto dos equipamentos envolvidos.

Quando reforçadas com barras e tubos de aço, fibras de vidro e perfis metálicos, as colunas de solo-cimento suportam bem os esforços de tração, flexão e cisalhamento. O *jet-grouting* armado com perfis metálicos foi usado em obras de rebaixamento de calado de portos em operação.

Um caso particular é o *jet-grouting* autoperfurante, em que a haste que perfura é a própria armadura da coluna, indicado para obras em que a introdução da armadura é dificultada. Um campo de atuação para o *jet-grouting* autoperfurante são os tirantes submersos, que permitem a execução de ancoragens ativas ou passivas sob a água, provisórias ou definitivas. A técnica, também conhecida como *Under Water Anchor*, é indicada para obras portuárias marítimas e fluviais que necessitem de reforços de paramentos de cais por conta da deterioração por vida útil ou para demandas de rebaixamento de calados devido a expansões de atividades.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

O objetivo do trabalho é apresentar a técnica de *jet-grouting* armado como alternativa de reforço do paramento de contenção em projetos para aumento de calado de cais portuário. Também serão descritos os principais aspectos físicos da técnica a serem considerados e serão apresentados dois estudos de caso de locais onde essa técnica já foi utilizada.

Além disso, será feita uma aplicação da técnica em uma seção transversal de um cais inspirado no Porto de Navegantes, em Santa Catarina, por meio do software Plaxis Introductory®, um programa de análise de tensão-deformação por elementos finitos.

### 2.2 Objetivos Específicos

Antes de estudar a técnica e suas aplicações, será explicada a motivação que levou ao desenvolvimento desse trabalho. Em junho de 2016 foram inauguradas as obras de expansão do Canal do Panamá, que se tornou o maior projeto de infraestrutura no local desde a sua implantação. Por isso, levantou-se a questão dos impactos dessa ampliação nos portos brasileiros, devido à transferência de embarcações maiores para rotas marítimas secundárias.

O aumento do porte dos navios expôs a infraestrutura rudimentar de muitos portos do país, além da profundidade limitada dos canais de acesso e berços de atracação. Isso porque, quanto maior a embarcação, maiores as exigências de calado e largura dos canais e das áreas de manobra. Dessa forma, optou-se por estudar uma técnica para aumento de calado, que já foi utilizada em alguns portos, e julgar sua eficácia em um cais baseado em uma situação real.

O berço de atracação estudado possui calado de projeto de 12 metros e o calado futuro será de 17 metros. Para avaliar essa intervenção, foram feitas diversas análises no software utilizado: situação atual com o calado de projeto, rebaixamento para o calado futuro, implantação de colunas de *jet-grouting* armado, implantação de tirantes de *jet-grouting* e as duas implantações em conjunto. Devido a simplificações da versão introdutória do programa, essas análises foram feitas considerando-se solo argiloso e solo arenoso, situação que não condiz com o perfil estratigráfico local.

A partir dos resultados obtidos, espera-se concluir se a técnica de *jet-grouting* armado é adequada para o rebaixamento do calado do porto em estudo. Caso contrário, serão apresentadas brevemente possíveis soluções para o reforço do paramento de contenção de cais portuário.

### 3 JUSTIFICATIVA

Desde as primeiras especulações sobre a expansão do Canal do Panamá, são debatidas as consequências desse evento para o Brasil. Certamente, os portos brasileiros precisam adequar sua infraestrutura para fortalecer sua posição competitiva no comércio mundial de cargas, eliminando as restrições de profundidade e largura dos canais de acesso às grandes embarcações.

Esse aumento na capacidade dos navios ocorreu de forma natural, uma vez que a inserção do contêiner propiciou a busca pela padronização e economia de escala. A partir do desenvolvimento da geração de navios *Post-Panamax*, o tamanho máximo dos navios conteineiros cresceu rapidamente, com redução do custo operacional. Segundo Bertolani e Leme (2004), os navios *Post-Panamax* e das gerações seguintes evoluíram sem restrições, de forma a atender uma nova rota de comércio entre a Costa Oeste dos Estados Unidos e a Ásia, ou seja, o Canal do Panamá não era mais uma base para as medidas dos navios porta-contêineres.

#### 3.1 Contextualização

A ideia de se construir um canal ligando o Oceano Pacífico ao Oceano Atlântico surgiu no final do século XIX pelos franceses. Nessa época, o Panamá ainda estava anexado ao território colombiano. Para construir o canal, a França formou a Companhia do Canal Interocéanica e recrutou 15 mil pessoas. Durante vinte anos, foram abertos grandes caminhos entre as montanhas que separavam as duas costas. A princípio, pretendia-se construir uma passagem no nível do mar, exatamente como havia sido feito no Canal de Suez. A empreitada, porém, fracassou em 1889, devido às dificuldades em se construir uma via aquática artificial em uma região montanhosa, além dos surtos de malária e febre amarela, que dizimaram aproximadamente 20 mil operários.

Em decorrência dessa profunda crise, os Estados Unidos, principal interessado na construção do canal, compraram as ações da incorporadora francesa por 40 milhões de dólares e passou a estudar diversas formas de dar continuidade ao empreendimento. Os americanos também selaram um tratado com a Inglaterra, a qual abriu mão de ser sócia na construção do canal e ainda permitiu que os EUA construissem uma base militar na região. Então, em outubro de 1903, os funcionários da *Panama Railroad Company* deflagraram um movimento separatista com o apoio dos fuzileiros norte-americanos e a Colômbia aceitou a independência do Panamá.

Em novembro de 1903 foi assinado o *Isthmian Canal Convention*, segundo o qual os Estados Unidos pagaram 10 milhões de dólares e mais 250 mil dólares anuais aos panamenhos em troca do domínio perpétuo sobre uma zona de 16 quilômetros.

Assim, o canal foi construído a partir de 1904. Para realizar esta obra, foi necessário perfurar um grande pedaço de terra utilizando mais de 30 mil quilos de dinamite. Aproximadamente 56 mil pessoas trabalharam na obra, que custou 375 milhões de dólares. Na Figura 1 é possível ver a construção do canal.

**Figura 1 - Andamento das obras em 11 de outubro de 1913.**



Fonte: <http://sobrefotos.com/2009/05/20/construccion-del-canal-de-panama/> (2016).

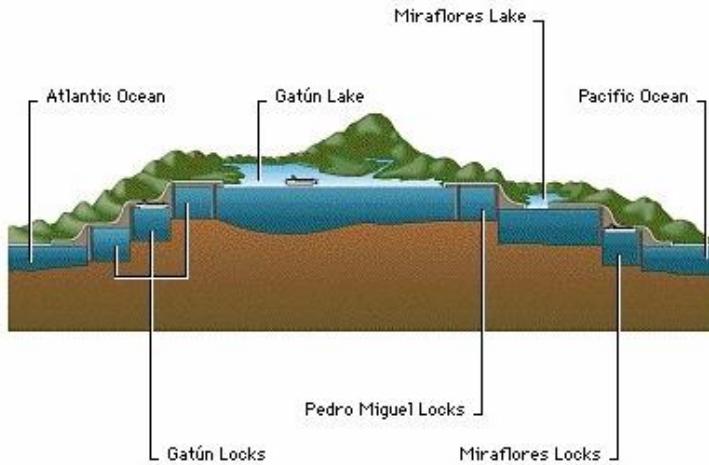
Os principais problemas enfrentados foram de engenharia, saneamento e organização. Os americanos decidiram construir eclusas para fazer os navios subirem e depois descerem as montanhas. Investiu-se também em infraestrutura sanitária para combater as doenças tropicais. Vencidas as dificuldades, o canal foi inaugurado dez anos depois, em 15 de agosto de 1914. Permaneceu em poder dos Estados Unidos até 1999, quando passou a ser literalmente do Panamá.

### **3.2 Operação do Canal do Panamá**

O Canal do Panamá apresenta 80 quilômetros de comprimento e une o Oceano Atlântico ao Pacífico por meio de um sistema de canais e lagos artificiais conectados por eclusas, que operam mediante um sistema por gravidade. Sua construção implicou atravessar um relevo com elevações de mais de 95 metros acima do nível médio do mar.

A travessia é feita por eclusas, em que a água funciona como um elevador. Vindo do Atlântico, por exemplo, o navio entra na comporta com a água no mesmo nível do oceano. Os portões são fechados e as válvulas de enchimento abertas. A água entra por meio de poços do piso, elevando o navio 24 metros, até o nível do Lago Gatún. A embarcação segue pelo lago até atingir as eclusas de Pedro Miguel, que se esvaziam até se igualarem ao nível do Lago Miraflores, 16,5 metros acima do nível do mar e 9,5 metros abaixo do nível anterior. Dentro do Lago Miraflores, o navio trafega até atingir as eclusas de Miraflores, que reduzem ainda mais o nível da embarcação, até atingir novamente o nível do mar, já do lado do Oceano Pacífico. Na Figura 2 tem-se uma ilustração do trajeto feito pelos navios que cruzam o canal.

**Figura 2 - Ilustração do trajeto percorrido pelos navios que cruzam o Canal do Panamá.**



Fonte: <http://www.editorialvirtual-mapp.com/CANAL-PANAMA.html> (2016).

O tempo médio que um navio leva para cruzar o canal são dez horas e, com a espera na fila, por volta de 27 horas. Cerca de 12 mil embarcações transitam pelo canal anualmente.

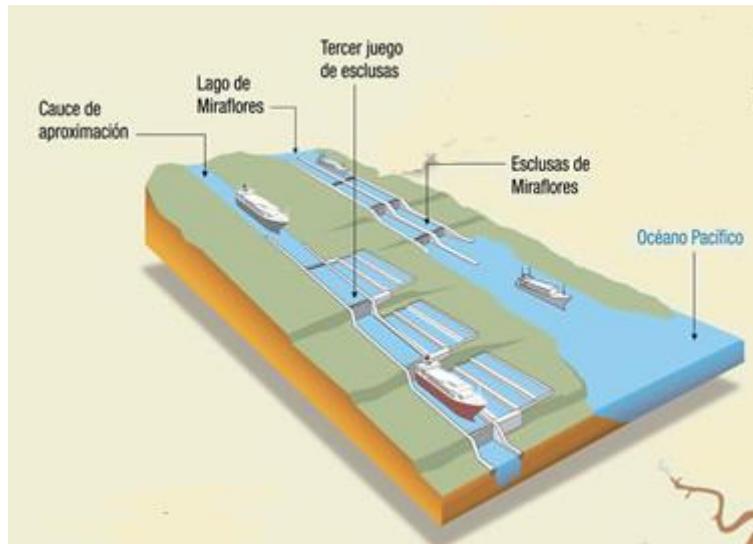
### 3.3 Expansão do Canal do Panamá

Foi implantada uma nova faixa de tráfego com dois novos sistemas de eclusas, dobrando a capacidade para permitir o transporte de maior volume de carga. O programa de ampliação consistiu em:

- Construção de um terceiro sistema de eclusas;
- Construção de um canal de acesso do Pacífico com 6,1 quilômetros de extensão, paralelo ao Lago Miraflores, que dará acesso às novas eclusas;
- Dragagem dos canais de navegação;
- Melhoria no abastecimento de água por meio do aumento do nível operacional máximo do Lago Gatún em 45 centímetros.

Na Figura 3 é possível ver a configuração após a ampliação do canal:

**Figura 3 - Configuração do Canal do Panamá após a expansão.**



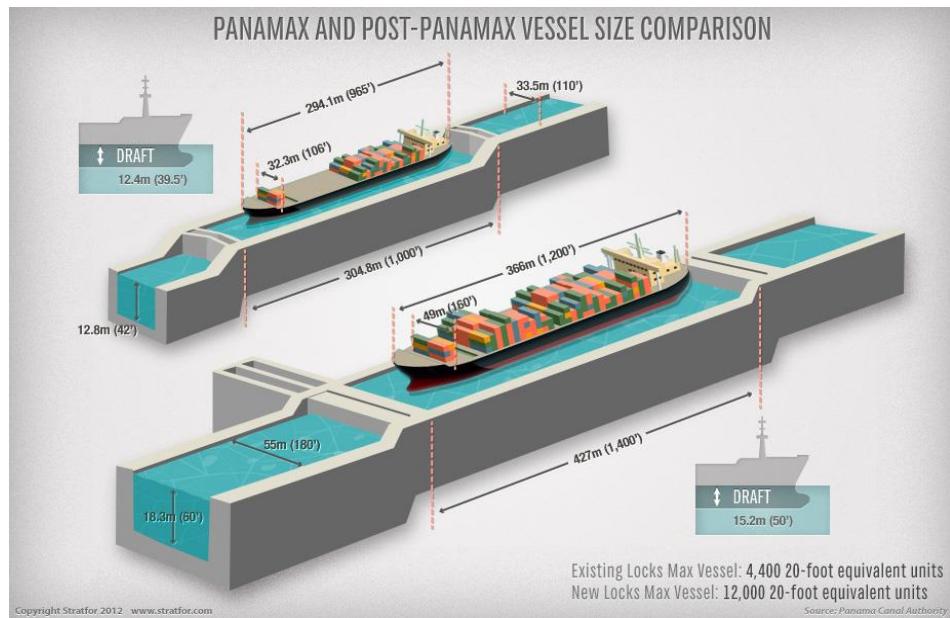
Fonte: <http://micanaldepanama.com/ampliacion/preguntas-frecuentes/#prettyPhoto>

As eclusas existentes antes da expansão permitiam a passagem de navios carregando até 5000 TEUs (*Twenty-foot Equivalent Unit*)<sup>1</sup>. Após a ampliação, os navios denominados *Post-Panamax* podem transitar pelo canal, com uma carga máxima de 12000 TEUs. Enquanto um cargueiro *Panamax* tem um comprimento máximo de 294,1 metros, largura de 32,3 metros e calado de 12,4 metros, que o faziam passar sem sobras nas eclusas antigas do canal, a geração *Post-Panamax* tem, em média, 366 metros de comprimento, largura de 49 metros e calado de 15,2 metros. Tal comparação está ilustrada na Figura 4.

---

<sup>1</sup> Um TEU representa a capacidade de carga de um contêiner marítimo normal, de 20 pés de comprimento (6,1 metros), por oito de largura e oito de altura.

**Figura 4 – Comparação entre as dimensões de navios das gerações Panamax e Post-Panamax.**



Fonte: <https://www.stratfor.com/image/panamax-and-post-panamax-vessel-size-comparison>

Os trabalhos para a ampliação do Canal do Panamá se iniciaram em setembro de 2007 e a sua inauguração foi em 26 de junho de 2016.

## 4 METODOLOGIA

Para coletar informações sobre a expansão do Canal do Panamá, buscou-se auxílio de especialistas da área de Engenharia Naval para a indicação de bibliografia adequada.

A descrição da técnica de *jet-grouting* e de suas aplicações está disponível em diversos textos acadêmicos e em catálogos das empresas que executam tal serviço. Apesar das tentativas malsucedidas de realizações de visitas a essas empresas, muitas informações estão disponibilizadas em sites da internet.

Em relação aos aspectos físicos da técnica a serem considerados, foram feitas reuniões com um especialista da área da construção de portos, com longa experiência na carreira, para discutir tais questões. Para a análise ambiental, adotou-se uma metodologia com base na elaboração de estudos de impactos ambientais, mas apenas como forma de chamar a atenção para o problema.

Finalmente, para a análise tensão-deformação utilizou-se o software Plaxis Introductory®, gratuito e disponível para estudantes, mas com muitas limitações, uma vez que a licença para utilizar a versão superior não estava acessível.

## 5 TÉCNICA DE *JET-GROUTING*

### 5.1 Introdução

A técnica de *jet-grouting* tem usos muito variados como elementos de fundação e de contenção. Nesse trabalho, serão abordados os seus usos como reforço de fundação e contenção de estruturas portuárias, com a finalidade de aumentar a cota de dragagem.

Serão apresentadas as técnicas de *jet-grouting* armado e de *jet-grouting* armado submerso (conhecido como tirante submerso ou *Under Water Anchor*), adequadas para essa finalidade devido à simplicidade do seu processo de execução. O desenvolvimento dessas técnicas originou-se do *jet-grouting* convencional, que já é conhecido no mercado brasileiro.

### 5.2 *Jet-grouting* convencional

O *jet-grouting* é uma técnica bastante versátil, podendo ser utilizada em situações em que se façam necessárias melhorias das propriedades do solo, como a redução de sua permeabilidade, e para a realização de reforços ou contenções.

A técnica tem como princípio a criação de colunas formadas pela mistura de solo com calda de cimento, a qual pode ser injetada sob altas pressões com o emprego de ar comprimido. Vale ainda destacar que o processo pode ser feito em quaisquer direções e é aplicável para qualquer tipo de solo, ainda que a versão convencional seja mais indicada para solos fracos e de baixa resistência.

#### 5.2.1 Equipamentos

Podem ser utilizadas perfuratrizes simples de uma haste (vide Figura 5) até equipamentos mais sofisticados de múltiplas hastes, variando de uma a quatro hastes (vide Figura 6), as quais possuem distâncias entre eixos ajustáveis.

**Figura 5 - Perfuratriz de haste simples.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apJetGrouting.pdf>

**Figura 6 - Perfuratriz de haste quádrupla.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apJetGrouting.pdf>

Além da especificação das quantidades de hastes, os equipamentos também variam quanto à utilização ou não de ar comprimido.

O método conhecido como CCP (*Cement Churning Pile*) não utiliza ar comprimido, e a calda de cimento é jateada por meio da pressão fornecida pela bomba. Nesse caso, a haste empregada possui uma única camada. Esse método produz colunas de diâmetros usuais de até 80 centímetros. Por utilizar somente a calda de cimento, esse sistema também é chamado de monofluido.

Já no método conhecido como JSG (*Jumbo Special Grout*), a calda de cimento é injetada sob altas pressões, sendo necessária outra camada na haste, formando duas hastes coaxiais, para a aplicação do ar comprimido. Devido a isso, é possível produzir colunas de maiores diâmetros, que podem chegar a 180 centímetros. Esse método é também chamado de bifluido, por empregar a calda de cimento e o ar comprimido.

Existe ainda o método em que, além do ar comprimido, é utilizado um jato de água, melhorando o desempenho do *jet-grouting*, e dessa forma sendo chamado de trifluido.

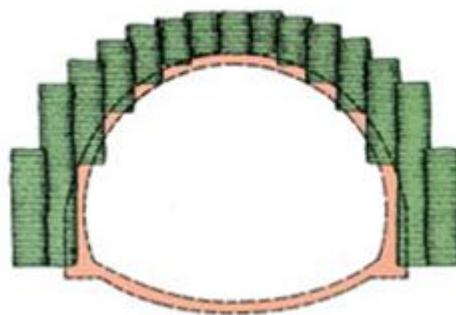
A ideia de utilizar o ar comprimido e o jato d'água durante a injeção é de desagregar o solo, facilitando sua mistura com a calda de cimento e produzindo uma coluna mais consolidada.

### 5.2.2 Aplicações

Como dito anteriormente, as aplicações mais usuais são para melhoria dos parâmetros do solo, mas também é muito utilizado para remediações ambientais.

Atualmente, essa tecnologia é muito utilizada para estabilizar temporariamente os emboques e desemboques de túneis, por meio de colunas horizontais ou verticais, como pode ser visto na Figura 7.

**Figura 7 - Utilização do *jet-grouting* convencional para consolidação vertical de abóbadas de túneis.**



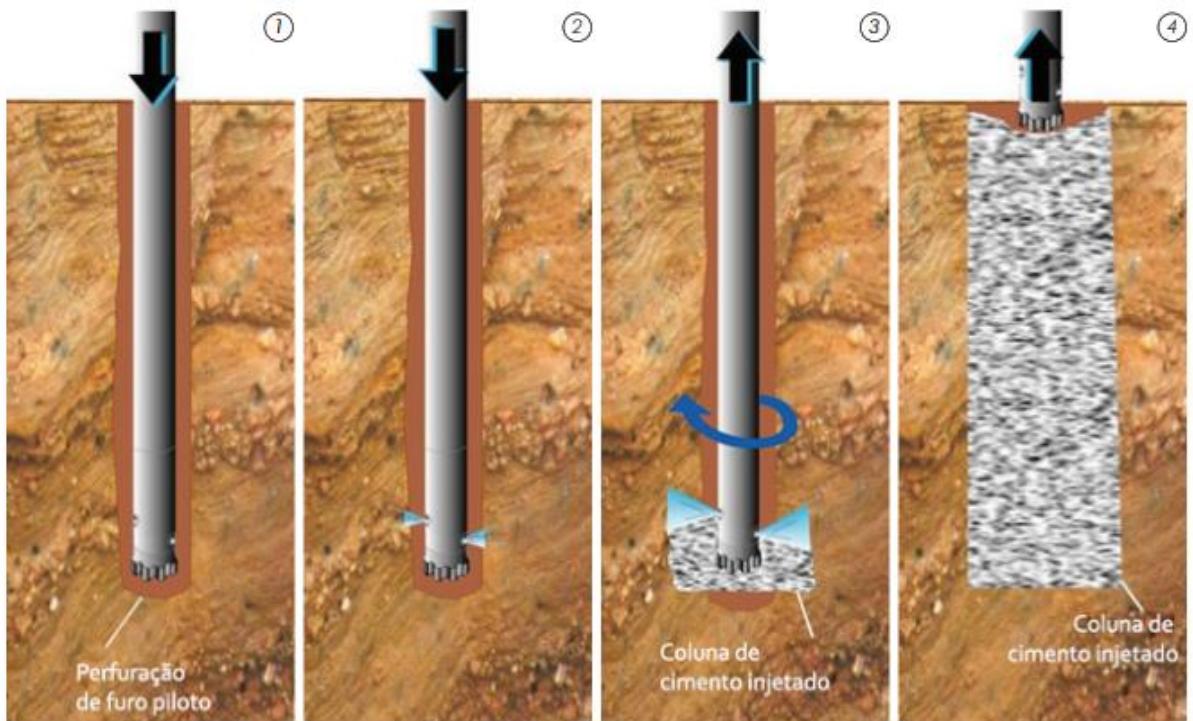
Fonte: Imagem disponibilizada pela empresa Geosonda S.A.

Também é muito utilizado para diminuir a permeabilidade do solo, em diversos tipos de obra, assim como para formar paredes e lajes de fundo de escavações e colunas de estruturação de maciços com pouca capacidade de suporte.

### 5.2.3 Etapas do processo construtivo

No modelo convencional, o processo se inicia com a perfuração do furo piloto até a cota estabelecida, utilizando uma haste de aço perfurante. A segunda etapa consiste na erosão e mistura do solo local com a calda de cimento por meio da concomitância de três ações: rotação da haste, injeção da calda de cimento na parte próxima à ponta sob alta pressão e ascensão da haste em ritmo controlado. Com a haste tendo alcançado a superfície, a etapa está concluída. A confecção de colunas de *jet-grouting* convencional está ilustrada na Figura 8.

**Figura 8 - Confecção de colunas de *jet-grouting* convencional.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apJetGrouting.pdf>

Para a execução de barreiras contínuas por meio da sobreposição de colunas de *jet-grouting*, é preciso garantir uma boa adesão no contato entre as colunas.

Na aplicação da técnica, percebe-se que quando o jato encontra um obstáculo, os efeitos produzidos são análogos aos efeitos produzidos pelo vento, produzindo filetes de calda em regime turbulento que formam redemoinhos e acabam por envolver a parte oposta do obstáculo. Dessa forma, uma coluna produzida nas proximidades de outra resultaria num bloco único. Tal adesão pode ser vista na Figura 9.

**Figura 9 - Adesão entre colunas de *jet-grouting*.**



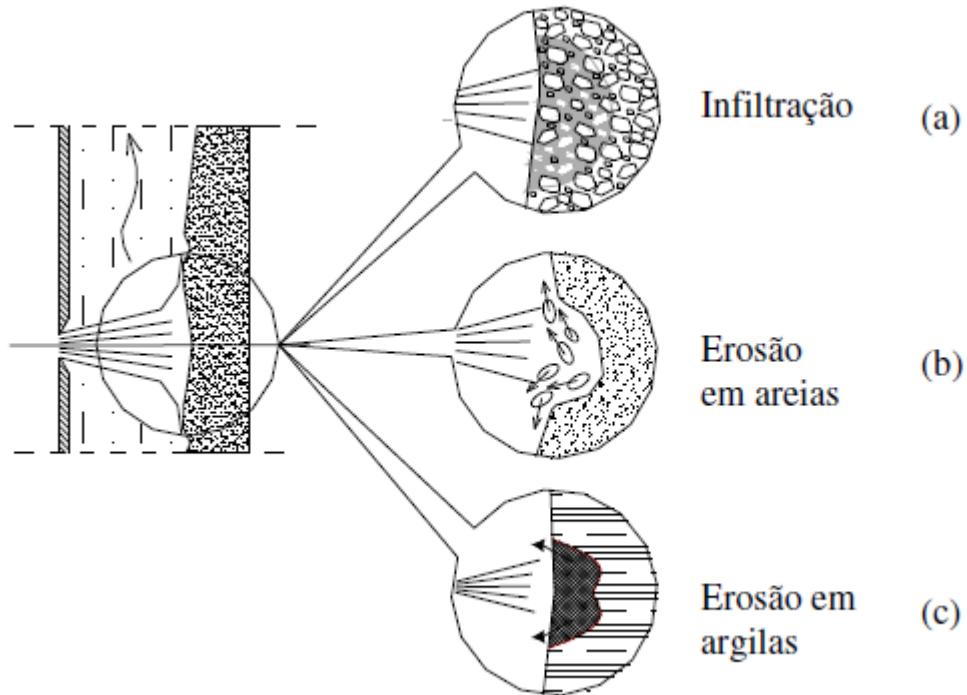
Fonte: Novatecna, 2003 *apud* Carletto, 2009.

#### **5.2.4 Especificações**

Para o dimensionamento das colunas de *jet-grouting*, são utilizados modelos empíricos em decorrência da complexidade do fenômeno mecânico que envolve a injeção da calda e as diversas variáveis do sistema, como pressão de bombeamento, relação água/cimento da calda, diâmetro e quantidade de bicos injetores, e as velocidades de extração e rotação das hastes durante a injeção.

Em relação ao tipo de solo, o comportamento da injeção é condicionado pela sua granulometria, conforme ilustrado na Figura 10:

**Figura 10 - Interação jato-solo.**



Fonte: Carletto, 2009.

Para solos com predominância de pedregulhos, a calda jateada tem a tendência de penetrar entre os poros do terreno, percolando radialmente. No caso de areias e argilas, como os poros são menores, há uma resistência do solo à percolação. Nesse caso, ocorre um fenômeno erosivo, deslocando as partículas do solo.

As argilas possuem uma resistência maior à erosão provocada pelo jateamento, produzindo colunas geralmente menores. Além disso, conforme observações experimentais feitas por Covil e Skinner (1994), em solos argilosos, a coluna é formada por substituição, ou seja, o solo desagregado pelo jato é arrastado com refluxo até a boca do furo e substituído pela calda injetada. Já nos solos arenosos, a coluna se forma pela mistura da calda com o solo.

É importante ressaltar que qualquer especificação dos materiais e equipamentos que serão empregados deve passar por ensaios prévios em laboratório e *in loco* sempre que possível. Os parâmetros (traço da calda, pressão empregada, velocidade de translação e rotação da haste e tempo de injeção) devem ser bem definidos e testados para se verificar a compatibilidade com o solo.

Alguns desses parâmetros são estimados preliminarmente, sendo ajustados conforme os ensaios. Como referência, pode-se considerar o traço da calda de cimento em peso como  $a/c = 1,0$ .

Pode-se também estimar o diâmetro necessário correlacionando-se com o SPT do solo, como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1 - Correlação do SPT de cada tipo de solo com o diâmetro das colunas de CCP.**

TIPO DE SOLO	SPT	DIÂMETRO (cm)
Areia com pedregulhos	-	50 ± 5
Areia	<4	80 ± 5
	4 a 10	70 ± 5
	10 a 20	60 ± 5
Argila	<2	70 ± 5
	2 a 8	60 ± 5
	8 a 15	50 ± 5

Fonte: [www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia\\_jg.pdf](http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia_jg.pdf)

**Tabela 2 - Correlação do SPT de cada tipo de solo com o diâmetro das colunas de JSG.**

TIPO DE SOLO	SPT	DIÂMETRO (cm)
Areia com pedregulhos	-	100 ± 5
Areia	<15	170 ± 5
	15 a 20	130 ± 5
	20 a 40	110 ± 5
Argila	<2	160 ± 5
	2 a 10	130 ± 5
	10 a 20	120 ± 5

Fonte: [www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia\\_jg.pdf](http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia_jg.pdf)

Podem-se estimar também, de maneira preliminar, as propriedades da coluna solo-cimento que será formada (vide Tabela 3), sendo sempre necessária a confirmação desses resultados por meio de ensaios posteriores. É possível também prever a quantidade de cimento a ser utilizada de acordo com o tipo de solo (vide Tabela 4).

**Tabela 3 - Propriedades da coluna de *jet-grouting* convencional.**

AGLUTINANTE	TIPO DE SOLO	RESIST. À COMPRESSÃO (MPa)	RESIST. AO CISALHAMENTO (MPa)
Cimento Portland	Areia	2,5 – 6,0	0,19
	Silte	2,0 – 4,5	0,25
	Argila	1,5 – 3,5	0,30
	Turfa e Argila Orgânica	0,5 – 2,5	-

Fonte: [www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia\\_jg.pdf](http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia_jg.pdf)

**Tabela 4 - Estimativa do consumo de cimento de acordo com o tipo de solo.**

TIPO DE SOLO	CONSUMO (kg/m <sup>3</sup> )
Areia	250 – 450
Silte	300 – 500
Argila	350 – 600
Turfa e Argila Orgânica	>600

Fonte: [www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia\\_jg.pdf](http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia_jg.pdf)

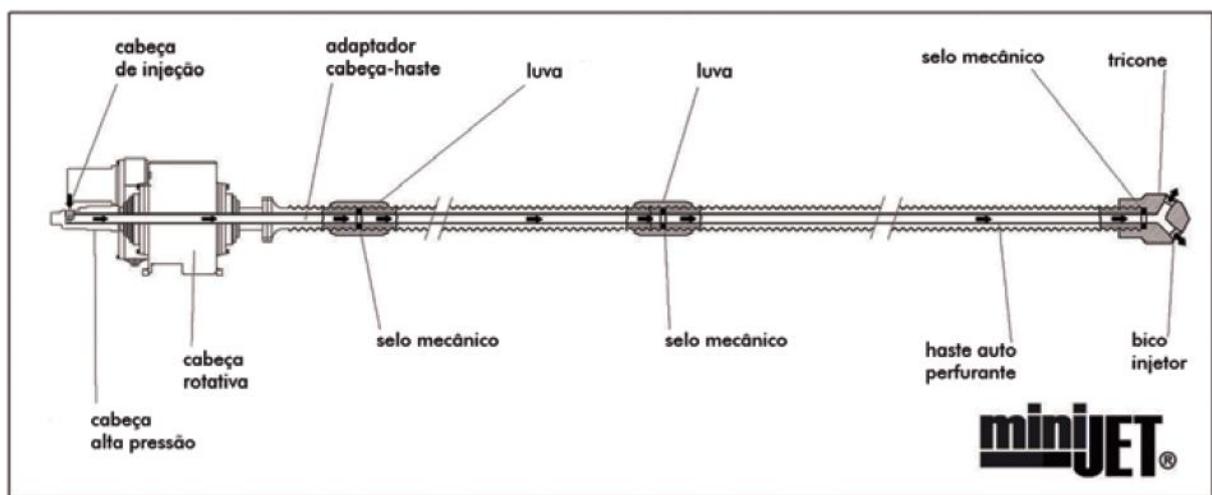
### 5.3 Jet-grouting armado

Uma técnica mais recente, o *jet-grouting* armado, é aplicável a qualquer tipo de solo, inclusive rochas. Esse dado, aliado à sua alta produtividade e confiabilidade, torna a técnica capaz de realizar fundações rotineiras e especiais, reforços de fundações, contenções e elementos de ancoragem e tratamento de solos.

#### 5.3.1 Equipamentos

A calda de cimento é injetada pelo orifício central de barras ou tubos metálicos e extravasa pelos bicos injetores. Na Figura 11 tem-se a seção longitudinal do equipamento utilizado para a execução de colunas de *jet-grouting* armado.

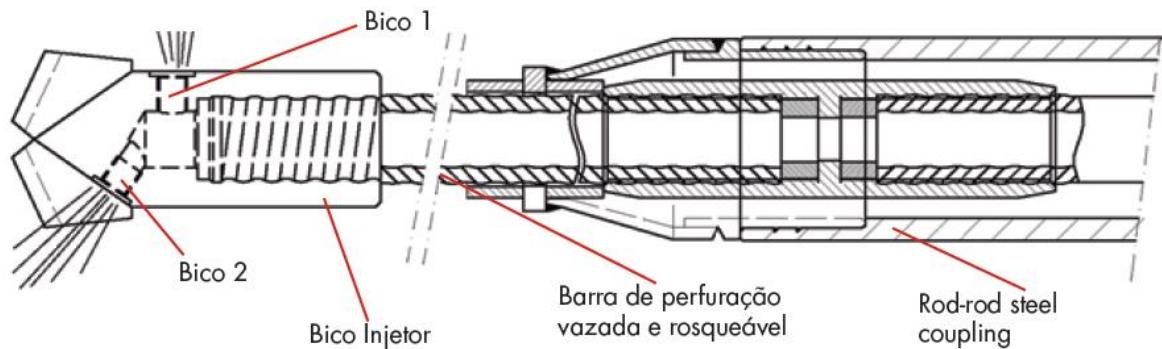
**Figura 11 - Seção longitudinal típica da montagem para execução do jet-grouting armado.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

Na Figura 12 é possível ver um corte transversal da cabeça rotativa à extremidade de corte. As barras são contínuas e emendas por luvas especiais rosqueáveis dotadas de selo mecânico para altas pressões (*rod-rod steel coupling*) e galvanizadas, ou seja, protegidas contra corrosão a longo prazo.

**Figura 12 - Detalhe da ferramenta de corte dotada de bicos injetores e proteção anticorrosiva.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

No caso do *jet-grouting* armado, uma vez que a haste metálica é incorporada à coluna de solo-cimento, é mais usual empregar-se a técnica CCP, em que não há uso de ar comprimido, por razões econômicas (haste mais simples) e estruturais, já que as propriedades da coluna formada melhoram significativamente com a atuação do aço, exigindo diâmetros menores em relação ao *jet-grouting* convencional.

### 5.3.2 Aplicações

Sendo o elemento armado, haveria a capacidade de o mesmo resistir aos esforços de tração e flexão. Porém, é necessário garantir que haja boa aderência entre a calda de cimento e a armadura.

Na Figura 13, tem-se o uso das colunas armadas como elementos de contenção lateral e de fundo da escavação.

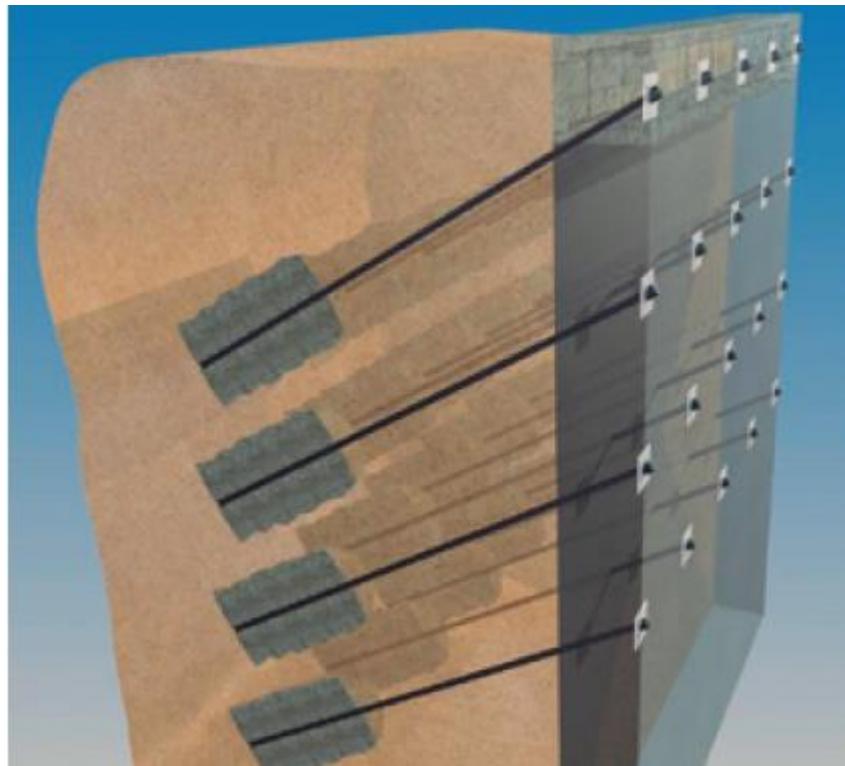
**Figura 13 - Jet-grouting armado como contenção lateral e de fundo em Guarujá (SP).**



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/200/artigo301307-2.aspx>

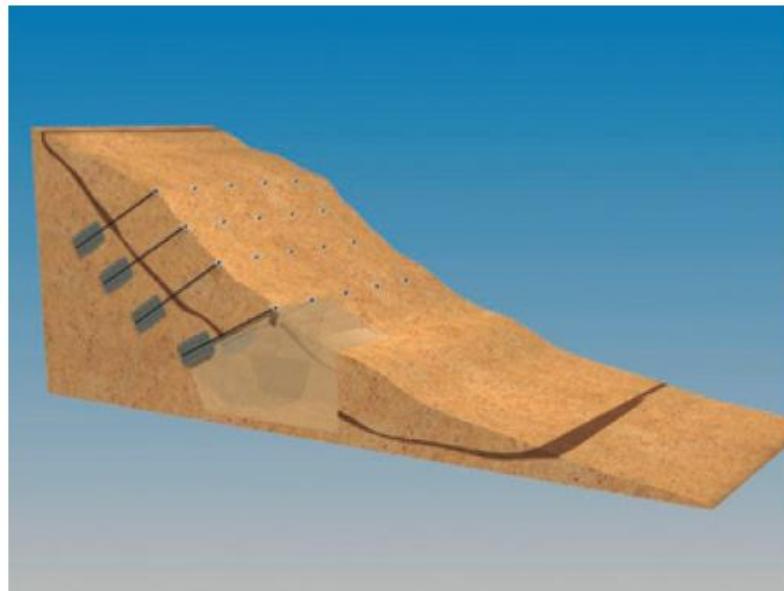
Sendo o elemento armado, também pode ser utilizado como tirante, executando a coluna de *jet-grouting* em seu bulbo e em qualquer direção, seja para equilibrar os empuxos numa contenção (vide Figura 14) ou mesmo para deslocar a cunha de ruptura de um talude instável para trás da região do bulbo, quando adequadamente dimensionado (vide Figura 15).

**Figura 14 - Tirantes protendidos sub-horizontais para muros de contenção.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

**Figura 15 - Tratamento de encostas e taludes instáveis.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

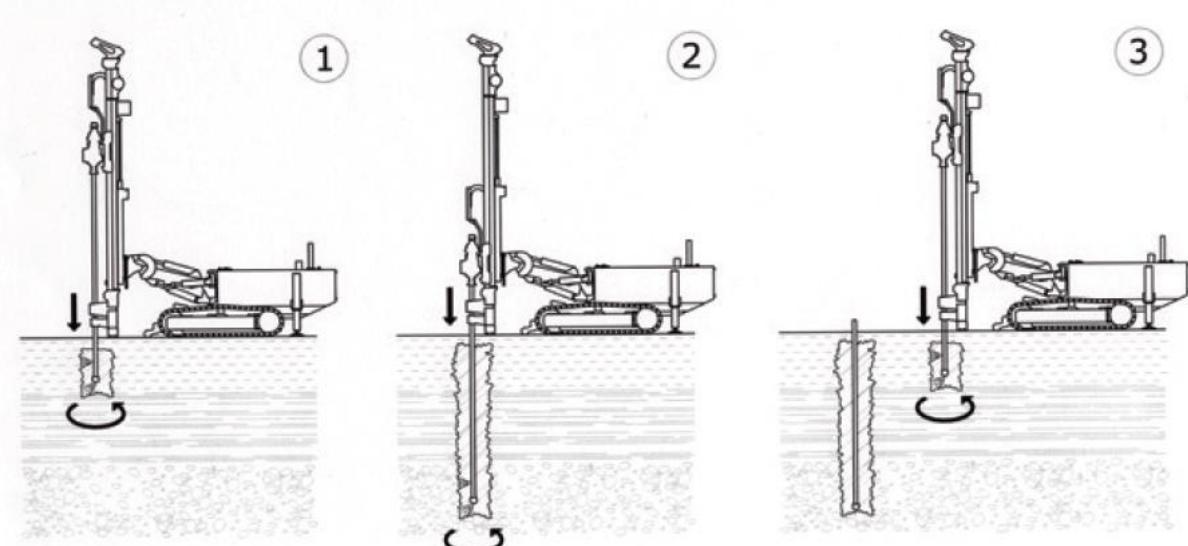
### 5.3.3 Processo construtivo

O princípio dessa técnica consiste na criação de um bulbo solo-cimento a partir da desagregação do solo e mistura com calda de cimento, assim como na técnica convencional, porém utilizando a haste como armadura. Devido a isso, o processo construtivo é simplificado na sua operação, de maneira que a formação da coluna solo-cimento acontece concomitantemente com a perfuração do solo, o que é conhecido como sistema "*jetting in*". Quando a cota de ponta de projeto é atingida, a haste é desacoplada da perfuratriz, passando a estruturar a coluna. Tal processo está listado a seguir e ilustrado na Figura 16.

- Etapas:

- 1 – Avanço da haste com injeção da calda de cimento sob pressão;
- 2 – Atingida a cota de apoio, é realizado o desacoplamento da haste;
- 3 – Acoplamento da haste do furo seguinte e reinício do processo.

**Figura 16 - Fases da execução - "jetting in".**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

No caso da utilização como tirantes, a injeção da calda de cimento é feita a partir da cota em que se inicia a região do bulbo e após sua execução é feita a protensão do tirante por meio da reação da placa de ancoragem.

### 5.3.4 Especificações

Os processos são semelhantes ao método convencional: alguns parâmetros são inicialmente estimados a partir das experiências com obras já executadas, mas sempre confirmado e observando os resultados obtidos com ensaios e testes realizados *in loco*.

Um cuidado que se deve ter ao utilizar o *jet-grouting* armado é em relação à aderência entre a calda de cimento e a armadura, conforme já mencionado. Uma forma de contornar esse problema seria adotar um comprimento de bulbo maior do

que o adotado para tirantes usuais, aumentando o comprimento de ancoragem da armadura.

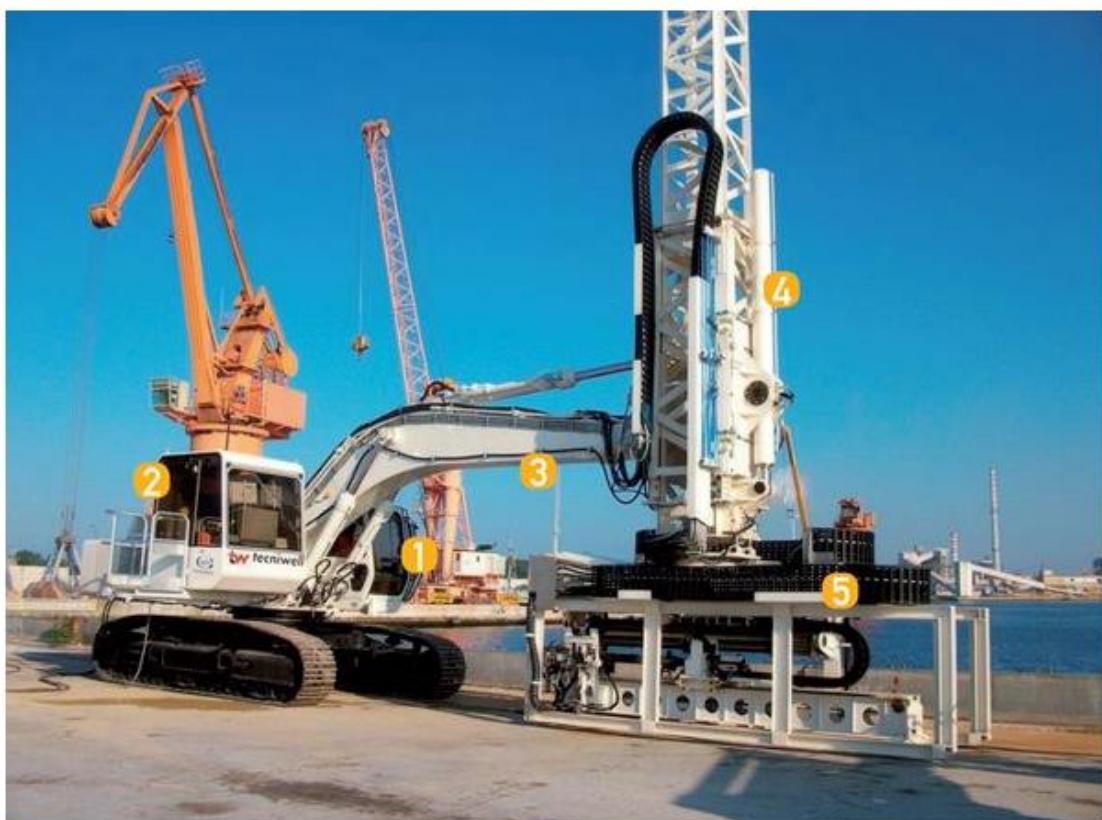
#### 5.4 Jet-grouting armado submerso

Por meio do uso da robótica, conseguiu-se evoluir ainda mais a técnica do *jet-grouting* armado, possibilitando desta vez o seu uso embaixo d'água. A tecnologia nomeada UWA – *Under Water Anchor* –, ou tirantes submersos, consiste no uso de uma perfuratriz robótica e à prova d'água conectada a uma torre telescópica, a qual se acopla a uma escavadeira, para a realização da técnica do *jet-grouting* armado.

##### 5.4.1 Equipamentos

A grande diferença na evolução do processo para o uso submerso está na sofisticação do equipamento, que permite um isolamento na região do furo. É possível ver o equipamento e a indicação de seus componentes na Figura 17.

**Figura 17 - Equipamento para a execução de tirantes submersos.**



- |  |   |
|--|---|
| <b>1</b> Cabine de comando 1<br><b>2</b> Cabine de comando 2<br><b>3</b> Escavadeira hidráulica 60 t | <b>4</b> Torre telescópica<br><b>5</b> Perfuratriz robótica |
|--|---|

Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

#### 5.4.2 Aplicações

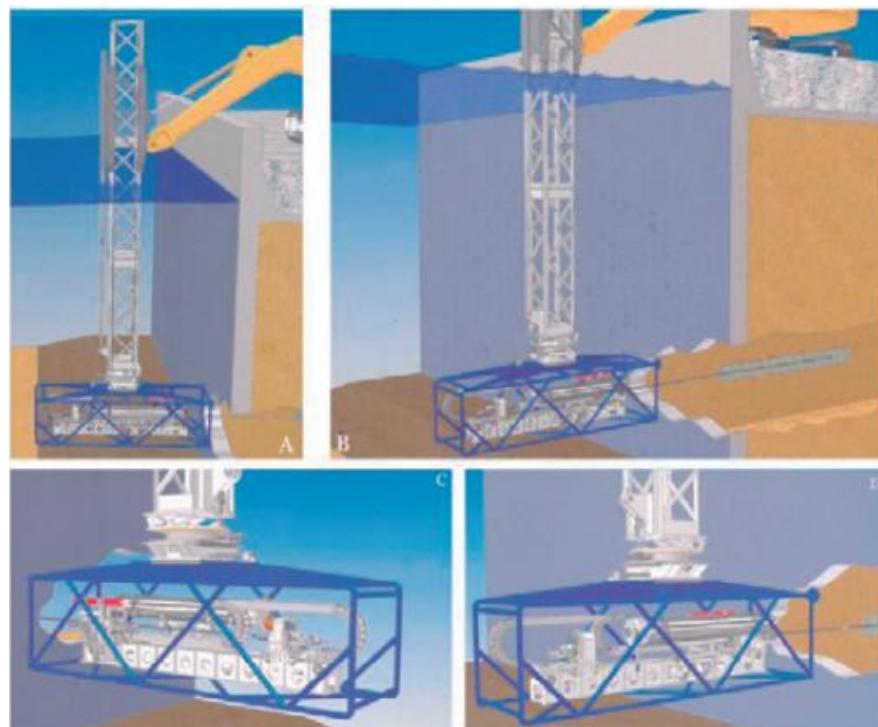
A técnica tem como utilização mais importante o uso em obras portuárias, tanto marítimas quanto fluviais, na realização de reforços de paramentos de cais e no rebaixamento de calados.

#### 5.4.3 Processo construtivo

As etapas do processo de escavação e injeção da calda de cimento são semelhantes às do processo de *jet-grouting* armado, porém existe adicionalmente a etapa de posicionamento da perfuratriz na coordenada do furo.

Durante todo o processo de execução, o operador controla o equipamento por meio de câmeras e também acompanha os parâmetros como torque, velocidade de perfuração, velocidade de rotação e pressão de injeção da calda de cimento. Esse processo de execução se encontra ilustrado na Figura 18.

**Figura 18 - Perfuração e injeção de *jet-grouting* armado submerso.**



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>

## 6 ASPECTOS FÍSICOS A SEREM CONSIDERADOS

Embora a técnica de *jet-grouting* se apresente como uma alternativa versátil e de rápida execução, existem alguns aspectos associados à sua aplicação que devem ser controlados.

### 6.1 Estabilidade local

Com a dragagem do fundo do berço de atracação, a massa de solo que exerce empuxo passivo sobre a estaca-prancha é retirada, e a porção de solo que exerce empuxo ativo aumenta, mudando o equilíbrio local entre empuxos.

É necessário verificar se a estaca-prancha é capaz de contribuir para a resistência contra a ruptura local, situação na qual ocorre uma ruptura nas proximidades da estaca-prancha, mas o restante da região, distante da estaca-prancha, mantém seu equilíbrio inalterado, de forma que seus pontos não sofrem deslocamento.

Caso a nova situação não seja equilibrada, o paramento de contenção precisa ser prolongado de forma a atravessar a superfície de ruptura local, ou seja, a ficha precisa ser aumentada. Uma das formas de prolongá-lo, visto que o aprofundamento da estaca-prancha e a soldagem de um novo trecho em seu topo são, na prática, inviáveis, é executar colunas de *jet-grouting* armado junto ao pé da estaca-prancha, de forma a prolongá-la indiretamente. O comprimento das colunas de *jet-grouting* armado deve ser suficientemente longo para atravessar a superfície de ruptura local. O diâmetro e a armação do *jet-grouting* devem resistir aos esforços de momento gerados pela diferença dos empuxos passivo e ativo.

### 6.2 Estabilidade global

Com a dragagem do fundo do berço de atracação, a massa de solo que exerce globalmente o momento estabilizante é retirada, ao passo que a massa de solo que exerce momento desestabilizante se mantém inalterada. Assim, pode ser que surja uma superfície de escorregamento em que esses momentos não se equilibrem, de forma que uma ruptura global ocorra. Uma forma de conter a instabilidade global é atravessando a superfície de escorregamento com estacas, de maneira a aumentar a resistência ao cisalhamento nessa superfície.

### 6.3 Conexão prancha-tabuleiro

O aumento do calado do berço de atracação faz com que o “vão livre” da estaca-prancha aumente. Dessa forma, os esforços de flexão aumentam na ligação entre a estaca-prancha e o tabuleiro do cais.

### 6.4 Fluidificação do solo argiloso

Um aspecto físico decorrente da execução das colunas de *jet-grouting* está ligado ao comportamento do solo na região do furo e suas adjacências durante e

após a formação das colunas, em especial quando executado em argilas de sensibilidade elevada.

A execução do *jet-grouting* promove a erosão e mistura do solo perfurado com a calda de cimento, com aumento de pressão dessa região, comprimindo as porções de solo adjacentes ao furo onde é aplicado.

O problema é que, em argilas sensíveis, essa pressão introduzida poderia causar um amolgamento do solo nas regiões adjacentes, devido à compressão dessa porção de terreno sem a alteração da umidade. Em decorrência desse amolgamento da argila de maior sensibilidade, haveria uma redução da resistência do solo de forma irrecuperável.

Uma vez que a resistência dessa porção de solo se reduz, pode haver uma compressibilidade excessiva nessa região, ocasionando recalques dessa camada e consequentemente recalques ao longo de toda a estrutura. Se esse fenômeno ocorrer na região da ficha da estaca-prancha, essa queda de resistência poderia ocasionar uma redução da apassivação do solo, podendo comprometer o equilíbrio de empuxos da estaca-prancha e dessa forma desestabilizar toda a estrutura do cais.

No caso do porto de Navegantes, na região da ficha da estaca-prancha em que será avaliada a execução de *jet-grouting*, o solo é composto predominantemente de argila mole a média. Embora a consistência não esteja diretamente atrelada à sensibilidade da argila, pode-se prever que uma argila de maior consistência apresente menor sensibilidade. Dessa forma, para o caso em estudo, não será levado em conta esse efeito, embora seja necessário avaliar por meio de ensaios laboratoriais se o efeito do amolgamento da argila nessa camada de fato não ocorrerá.

## 6.5 Tirante

### 6.5.1 Exequibilidade em função da modulação do estaqueamento existente

Um aspecto importante a se considerar no uso do *jet-grouting* armado como tirante é a interferência com as outras estacas já existentes, tanto do cais quanto da área do retroporto.

No caso de Navegantes, só no retroporto foram executadas mais de 1300 estacas verticais ou inclinadas, com comprimento de 40 metros. No cais, existe uma linha de estacas de alívio, com espaçamento de 4 metros e diâmetro de 80 centímetros, e duas linhas de tubulões, espaçados em 6 metros e com diâmetro de 1,5 metros.

Essa diversidade de espaçamentos e estacas tornaria inviável a adoção de um espaçamento uniforme para os tirantes ao longo de todo o cais, e dessa forma, a análise do comportamento estrutural seria mais complexa.

### 6.5.2 Ancoragem (eventual) em argila mole

Caso o tirante seja ancorado numa camada de argila de alta sensibilidade, poderá ocorrer o mesmo processo explicado no item 6.4, causando recalques na retroárea devido à fluidificação da camada de argila, em decorrência da perda de resistência devido ao seu amolgamento.

Além dos recalques, a perda de resistência da região do bulbo de ancoragem do tirante poderia afetar a resistência lateral de cisalhamento das estacas, interferindo em sua capacidade de carga, comprometendo também a fundação da retroárea.

No caso do porto de Navegantes, o perfil geológico do terreno é composto por camadas intercaladas de argila e areia, portanto uma solução para esse problema seria atirantar o *jet-grouting* numa cota e inclinação tal que seu bulbo fique numa camada de areia ou de argila pouco sensível suficientemente espessa para não afetar a região com argila de maior sensibilidade.

### **6.5.3 Problema de atirantamento em estaca-prancha**

Além do problema da exequibilidade dos tirantes e da possível ancoragem em solo argiloso, ainda existe o problema relacionado ao seu atirantamento na estaca-prancha.

O problema consiste na modulação da estaca-prancha. Usualmente, os perfis laminados de estaca-prancha possuem larguras de até 80 centímetros, e o encaixe entre os perfis é feito por soldagem, sem um cálculo rigoroso da ligação. Dessa forma, o caminhamento dos esforços de momento fletor entre os módulos de perfil na direção longitudinal fica prejudicado.

Se o espaçamento dos tirantes fosse suficientemente pequeno para aplicá-los em cada módulo de perfil, não haveria a necessidade de transmitir os esforços de protensão do tirante ao longo dos módulos da estaca-prancha. Porém o espaçamento usual para tirantes é entre 2 a 4 metros, por questões de viabilidade econômica. Dessa forma, haveria uma falha na mobilização de toda a estaca-prancha devido à protensão dos tirantes.

Para contornar esse problema, seria necessário executar uma viga longarina ao longo da extensão a ser atirantada. Por meio da longarina, os esforços de protensão dos tirantes mobilizariam a estaca-prancha ao longo de toda sua seção longitudinal.

Vale ressaltar que haveria uma complicação para a execução da viga longarina, pois é um elemento que estaria submerso. Além da complicação de alocar esse elemento na posição correta, seria necessário executar a ligação entre a viga e a estaca-prancha, podendo ser requisitado o uso de equipamentos especiais e mão de obra especializada para sua execução, além do problema de interromper a operação portuária.

## **6.6 Levantamento de fundo de canal devido ao uso de *jet-grouting***

Com o uso da técnica para aprofundamento da ficha da estaca-prancha, haveria um problema ligado ao aumento das tensões do solo da região do fundo do canal. Ao injetar a calda de cimento sob pressão, as tensões no solo nas adjacências do furo aumentariam, comprimindo essa região do maciço, e esse esforço seria transferido para as porções de solo acima dessa região, chegando ao fundo do canal. Esse aumento das tensões de compressão resultaria num recalque vertical para cima, produzindo um levantamento do fundo do canal.

Para contornar esse problema, a cota de aplicação do *jet-grouting* precisa ser suficientemente afastada do fundo do canal, e a pressão de injeção da calda precisa ser bem controlada. No caso do porto de Navegantes, isso de fato ocorre, pois o fundo do canal estaria, com o aumento de calado, na cota -17m, e a ficha da estaca-

prancha está apoiada na cota -35m, aproximadamente. No entanto, não foram avaliados os efeitos do levantamento de fundo devido à aplicação do *jet-grouting* para o aumento da ficha da estaca-prancha.

## **6.7 Problemas associados ao aprofundamento do cais portuário**

Com o aprofundamento da cota de dragagem e a possibilidade de atracação de navios de maior calado, haveria uma mudança na vocação do porto quanto à embarcação-tipo, aos equipamentos utilizados e à sobrecarga na retroárea.

Dessa forma, a estrutura portuária seria requisitada de forma diferente da planejada inicialmente, sendo necessário destacar alguns aspectos decorrentes da ampliação do calado.

### **6.7.1 Aumento das forças de atracação/amarração**

A possibilidade de o porto abrigar navios maiores do que o previsto na concepção existente ocasionará um aumento dos esforços introduzidos na estrutura devido à atracação e amarração dessas embarcações.

Os novos esforços horizontais introduzidos nas defensas devem ser também avaliados, analisando o caminhamento das cargas através da laje do cais até as estacas, e até a laje e fundação da retroárea.

Essa análise não será abordada na simulação que foi feita com o auxílio do software para desenvolvimento da solução estrutural com uso de *jet-grouting*, porém é um aspecto que deve ser destacado.

### **6.7.2 Aumento da sobrecarga na retroárea**

Com o aumento da capacidade das embarcações (deslocamento), a movimentação de carga na retroárea aumentaria assim como a concentração de contêineres no cais e no retroporto. Dessa forma, também é necessário avaliar se a estrutura é capaz de suportar os novos esforços verticais solicitantes.

Esse fator foi considerado no cálculo realizado por meio do software, aplicando a sobrecarga no cais e na retroárea considerando um aumento do volume de carga movimentado e aplicado em cima dessas estruturas.

### **6.7.3 Troca de equipamentos do cais portuário**

Com o aumento das embarcações e consequentemente de suas capacidades de carga, haveria também um impacto nos equipamentos do cais portuário, refletido na necessidade de adotar equipamentos de maior alcance e com maior rapidez na execução de manobras de carga e descarga dos navios.

Dessa forma, são esperados maiores esforços solicitantes advindos desses novos equipamentos, sendo necessário considerá-los na avaliação do desempenho da estrutura do cais, tanto da laje quanto das estacas de alívio.

## 6.8 Mudança no andamento dos esforços no maciço de solo

O rebaixamento da cota de dragagem do berço de atracação proposto seria feito por meio de dragagem, sem taludamento, tratando a estaca-prancha como contenção para o solo.

Os esforços presentes no maciço antes da dragagem teriam seu andamento alterado, solicitando a estaca-prancha de maneira diferente. O empuxo passivo existente na cortina seria reduzido pela remoção da porção de solo dragado, forçando um novo ponto de equilíbrio entre os empuxos.

Levando em consideração que a estaca-prancha sofreria um deslocamento horizontal devido ao seu desconfinamento, haveria uma rotação da cortina em relação ao topo, redistribuindo parabolicamente o empuxo do maciço (Taylor apud Tschebotarioff).

## 6.9 Conexão prancha-coluna *jet-grouting (tension cut-off)*

Para a execução da coluna de *jet-grouting* visando ao aumento da ficha da estaca-prancha, há um aspecto relacionado à conexão entre esses elementos. Essa ligação não apresenta resistência à tração, pois não ocorre a aderência entre os elementos.

Dessa forma, quando ocorrerem deformações na estaca-prancha, poderá haver um descolamento entre a cortina e a coluna de *jet-grouting* e, consequentemente, não haveria transferência dos esforços de força cortante e de momento fletor.

Esse efeito deve ser levado em conta no cálculo utilizando-se modelos de *tension cut-off*, que permitem desprezar a parcela de resistência à tração nessa conexão.

## 7 ANÁLISE AMBIENTAL

### 7.1 Explicação e importância

A validação ambiental é algo de grande relevância para uma obra de engenharia. Nesse contexto, destaca-se de imediato que em uma área sensível como um porto, fluvial ou marinho, toda atividade a ser realizada, seja ela de construção, reforma ampliação ou operação, deverá ter um estudo de impacto ambiental (EIA) associado, realizado por uma equipe multidisciplinar, competente e imparcial, de modo a se identificar, quantificar e qualificar os possíveis impactos ambientais. Dessa forma, primeiramente verifica-se a viabilidade da obra em questão, e, caso ela seja viável, deve-se evitar, reduzir ou compensar os possíveis impactos negativos que possam ocorrer.

### 7.2 Metodologia

No contexto do uso da técnica de *jet-grouting* armado para o aprofundamento do calado do berço de atracação, será explicada a metodologia para uma primeira análise de impactos ambientais, a qual não exclui o dever legal de se realizar um estudo de impacto ambiental, ao mesmo tempo em que será exemplificada a sua aplicação.

Vale ressaltar que os impactos ambientais resultantes de determinada ação podem ser muito variados dependendo do ambiente em que estão situados, de tal maneira que a análise aqui trará efeitos em um contexto mais genérico, fazendo com que o estudo desses parâmetros e de outros, não mencionados devido a sua especificidade, devam ser aprofundados quando tratados em um local específico.

A primeira etapa para a avaliação é caracterizar os momentos do processo a ser realizado (em geral, construção e operação) e as ações passíveis de gerar impactos. No contexto estudado, em que se está ampliando um porto já estabelecido e tendo em vista o enfoque na técnica, haverá um único momento (obra de aumento da profundidade) e uma única ação (aplicação da técnica de *jet-grouting* armado).

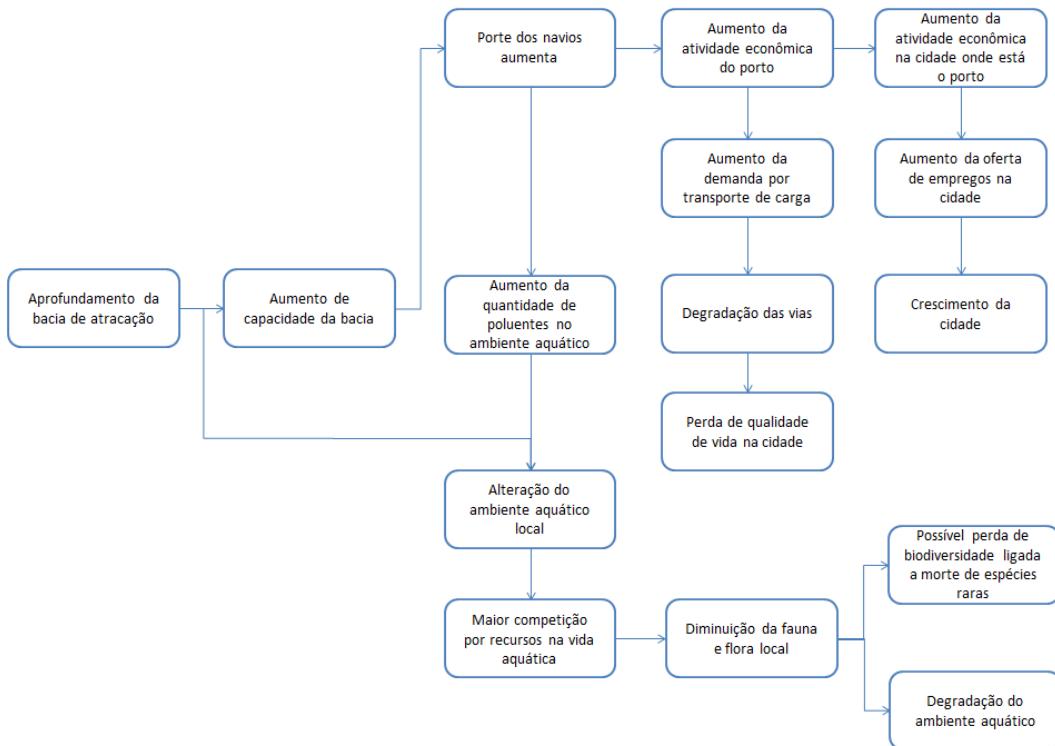
A etapa seguinte é a identificação de impactos ambientais. A análise será feita pela divisão nos meios Físico, Biótico e Socioeconômico, fornecendo uma base para identificar as consequências da ação proposta. Para tanto, será apresentado um quadro síntese de referência para caracterização de impactos e uma rede de interação exemplificando a reação em cadeia gerada por uma das ações do quadro (o ideal é fazer tantas redes de interação quanto possível). Vale ainda ressaltar que em outros casos é ideal criar-se outra tabela em que possa ser verificado em que momento do processo (construção e/ou operação) acontece cada processo e impacto ambiental. Na Tabela 5 tem-se o quadro síntese com os impactos ambientais em cada meio.

**Tabela 5 - Quadro síntese de referência para caracterização de impactos ambientais.**

	Parâmetro	Situação Atual	Ação	Situação final do Ambiente	Impacto Ambiental
		Processo natural	Aplicação da Técnica de <i>jet-grouting</i> armado	Processo ambiental modificado	Variação da qualidade ambiental entre os estados inicial e final
Meio Físico	Qualidade das Águas Costeiras	Águas naturais com pouca concentração de poluentes	Aplicação da nata de cimento no local alvo podendo ser carregada e diluída na água	Alteração dos parâmetros de turbidez, pH da água	Degradação da qualidade da água
	Nível de Ruidos	Nível de ruído normal do porto	Utilização de maquinário no local	Alteração do nível de ruído local	Aumento do nível de ruído no local
	Qualidade dos Solos	Solo em estado natural, não contaminado	Utilização de maquinário podendo conter vazamentos, ou calibração incorreta da pressão da bomba pode causar afloramento da nata de cimento em outros locais	Mudança das propriedades do solo, presença da nata de cimento em locais onde não deveria (contaminação)	Mudança das características do solo e contaminação em alguns locais
Meio Biótico	Fauna aquática	Sobrevivência das espécies da região	Contaminação pela nata de cimento durante execução; Movimentação de navios maiores durante a operação	Alteração da qualidade das águas	Espécies desaparecem ou migram; colonização dos segmentos nus das estruturas por organismos bentônicos
	Flora aquática	Ciclo de vida aquático	Contaminação pela nata de cimento durante execução; Movimentação de navios maiores durante a operação	Alteração da qualidade das águas	Descaracterização do ambiente aquático modificando a flora presente
Meio Socio econômico	Nível de Operação viário	Vias da região de entorno do porto operando em regime normal	Entrada e saída dos equipamentos necessários para se fazer o uso do <i>jet-grouting</i> ; Aumento do berço de atracação	Alteração da operação viária local	Intensificação do trânsito na região
	Atividade econômica no porto	Porto operando com capacidade limitada devido a profundidade da sua bacia de atracação	Aprofundamento da bacia de atracação	Navios maiores conseguem atracar	Aumento da capacidade portuária; Aumento da atividade econômica local

Na Figura 19, é ilustrada uma rede de interação exemplificando a reação em cadeia gerada pelo aprofundamento do calado da bacia de atracação.

**Figura 19 – Rede de interação.**



O segundo passo agora é avaliar a importância dos impactos ambientais destacados no quadro síntese. Para isso, serão adotados fatores, os quais terão pesos diferentes, e que serão usados para quantificar cada um dos impactos.

Para o caso em questão, serão adotados como fatores a magnitude do impacto, a reversibilidade do impacto e a probabilidade de ocorrência do evento. Tais informações estão contidas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Fatores e pesos considerados.**

Fatores	Pesos Considerados
<b>Magnitude do Impacto</b>	4
<b>Reversibilidade</b>	3
<b>Probabilidade de Ocorrência do evento</b>	3

Nas Tabelas 7 a 9, os fatores são divididos em escalas e a cada escala é atribuída uma nota.

**Tabela 7 - Escala da magnitude de impacto.**

Escala	Nota Atribuída
Pequena	1
Média	2
Grande	3
Muito Grande	5

**Tabela 8 - Escala da reversibilidade do impacto.**

Escala	Nota Atribuída
Reversível	1
Irreversível	3

**Tabela 9 - Escala da probabilidade de ocorrência do evento.**

Escala	Nota Atribuída
Baixa	1
Média	2
Alta	4
Certa	5

Com estes fatores e seus respectivos pesos e notas, consegue-se criar uma matriz de impactos ambientais, conforme pode ser visto na Tabela 10.

**Tabela 10 - Matriz de impactos ambientais.**

	Impacto Ambiental	Magnitude do Impacto (peso 4)	Reversibilidade (peso 3)	Probabilidade de Ocorrência do evento (peso 3)	Total
	Variação da qualidade ambiental entre os estados inicial e final				
Meio Físico	Degradação da qualidade da água	3	1	4	27
	Aumento do nível de ruído no local	1	1	5	22
	Mudança das características do solo e contaminação em alguns locais	2	3	2	23
Meio Biótico	Espécies desaparecem ou migram; colonização dos segmentos nus das estruturas por organismos bentônicos	5	3	1	32
	Descaracterização do ambiente aquático modificando a flora presente	3	3	2	27
Meio Socioeconômico	Intensificação do trânsito na região	2	3	4	29
	Aumento da capacidade portuária; Aumento da atividade econômica local	5	1	5	38

Com esta matriz em mãos, pode-se verificar por meio do resultado total qual a viabilidade ambiental do empreendimento (lembrando que está é apenas uma primeira análise), além de possibilitar perceber de maneira mais clara quais são os possíveis problemas ambientais mais graves.

Por fim, a etapa final consiste na gestão ambiental da obra. Devem-se propor soluções a fim de evitar, mitigar ou compensar os efeitos identificados no estudo.

## 8 ESTUDOS DE CASO

### 8.1 Porto de Navegantes, Santa Catarina

A empresa Costa Fortuna Engenharia de Fundações, conjuntamente com o Layne Geogroup, foi contratada pela construtora Triunfo para a execução de 504 colunas verticais e 812 colunas inclinadas de *jet-grouting* armado, com 600 milímetros de diâmetro e até 40 metros de comprimento. Essas quantidades totalizaram 17.854 metros de colunas verticais e 28.347 metros de colunas inclinadas.

Obra pioneira em território nacional com o emprego da técnica de *jet-grouting* armado. Utilizaram-se tubos metálicos lisos tipo API 5CT. A API 5CT é uma norma, publicada pelo *American Petroleum Institute*, que especifica e estabelece diretrizes de qualidade para tubos e invólucros de aço: equivale a ISO 11960:2004. A técnica do *jet-grouting* armado foi escolhida em substituição à alternativa com estacas raiz previamente concebida em projeto, portanto se tratou de um caso de fundações profundas, em oposição aos casos em que o *jet-grouting* armado foi usado para realização de tirantes, o que já foi descrito nesse trabalho e será visto no outro estudo de caso.

O projeto consistiu na execução de uma série de estacas armadas na área de retroporto, ligada por um sistema de vigamento e transferência de esforços à extremidade do cais, onde se atracam os navios. O propósito concebido para essa intervenção foi o de criar um travamento de topo da estrutura já existente de modo a criar condições para que ela suporte os novos esforços de flexão a que as contenções estarão sujeitas após o rebaixamento de 3,0 metros do calado atual, além dos esforços horizontais gerados pela atracação de embarcações maiores. A execução das colunas de *jet-grouting* armado pode ser vista nas Figuras 20 e 21.

**Figura 20 - Colunas de *jet-grouting* armado sendo realizadas no retroporto em Navegantes.**



Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações.

**Figura 21 - Colunas de *jet-grouting* armado sendo realizadas no retroporto em Navegantes.**



Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações

Os carregamentos de trabalho das estacas são de 80 tf à compressão, 70 tf à tração e 5 tf de esforço horizontal.

Por ser uma técnica nova em território nacional, antes de sua execução foram realizadas estacas teste em escala real para colocar à prova a confiabilidade dessa tecnologia. No caso, além de corroborar a eficácia das colunas de *jet-grouting* armado como substitutas de estacas raiz, o desempenho das estacas teste de *jet-grouting* superou de tal maneira os requisitos mínimos que foi realizada uma revisão do projeto executivo, visando à redução dos comprimentos das estacas. As estacas testes estão ilustradas na Figura 22 e sua posterior exumação está representada na Figura 23.

Nesta região, o solo é composto por areias compactas e argilas médias. Para essas condições, a pressão de jateamento da calda de cimento gerou diâmetros médios de 55 centímetros para as colunas de solo-cimento armado.

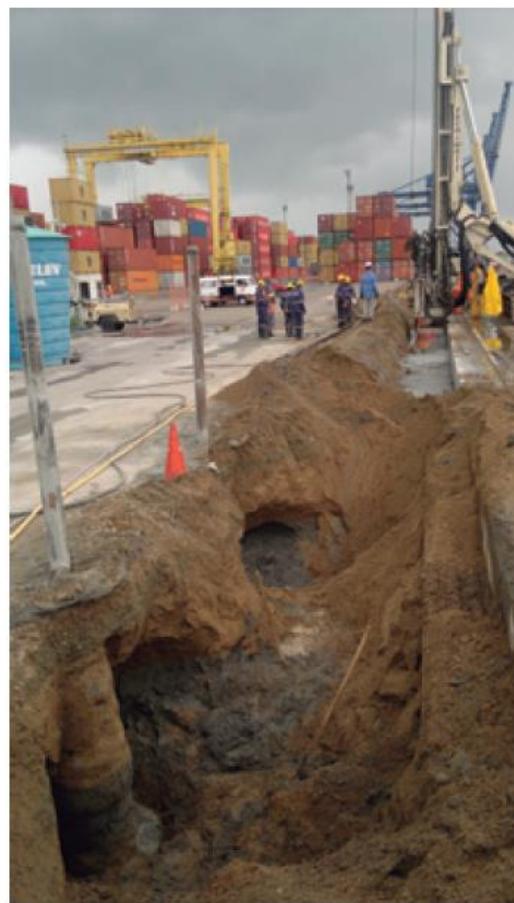
**Figura 22 – Estacas testes de *jet-grouting* armado no Porto de Navegantes.**



*Fig. 30 - Execução de um*

Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações.

**Figura 23 – Exumação das estacas testes, realizadas no retroporto de Navegantes.**

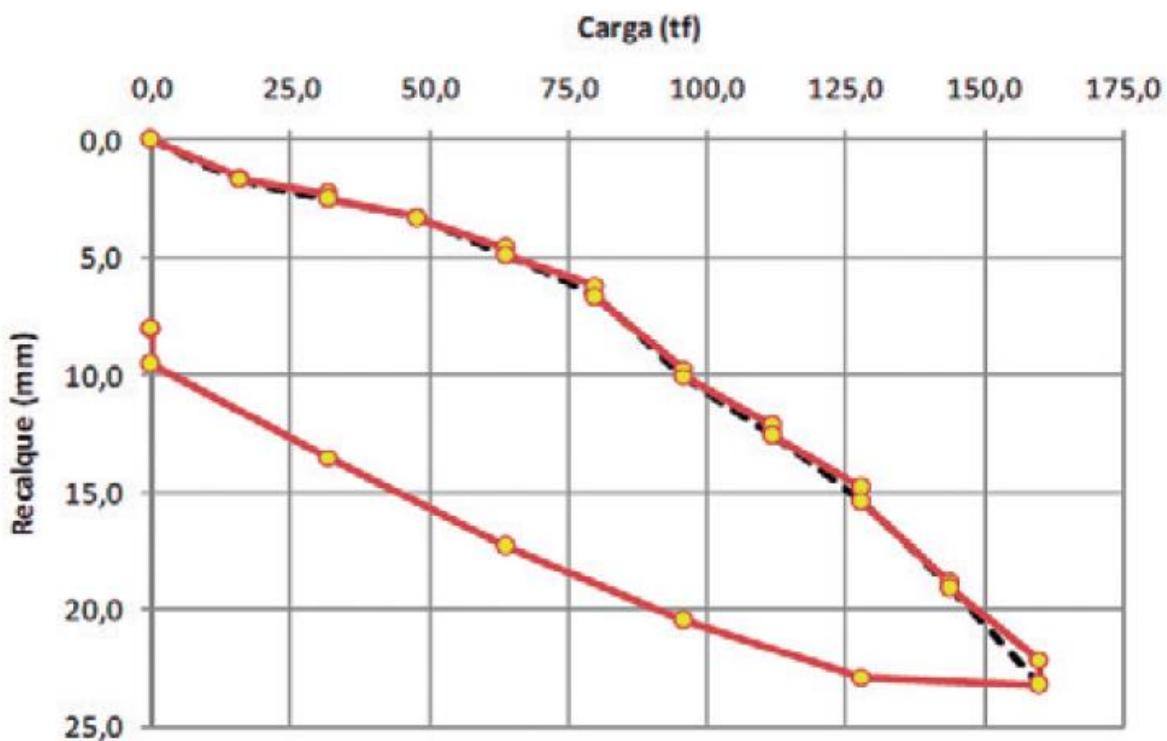


Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações.

As provas de carga foram realizadas levando as colunas teste ao dobro da carga de trabalho do projeto, 80 tf, ou seja, foram comprimidas com 160 tf. No caso de tração, as colunas teste foram submetidas a carga máxima de 80 tf, ao passo que a carga de trabalho de projeto é de 60 tf. Os resultados dos testes foram os seguintes (vide Figuras 24 e 25):

- Compressão:
  1. Carga máxima de teste: 160 tf; Deformação total: < 25,0 mm.
  2. Carga de trabalho: 80 tf; Deformação total: 6,72 mm.
  3. Recalque residual: 7,97 mm.

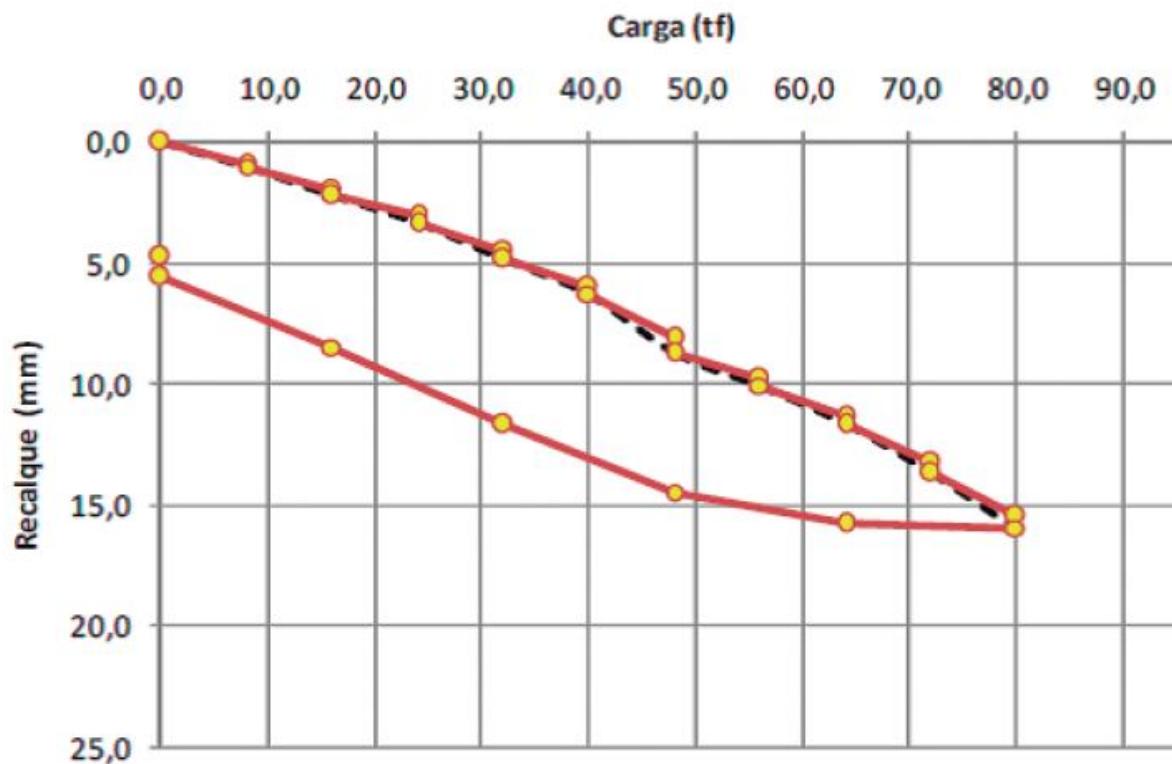
**Figura 24 - Resultado gráfico das provas de compressão das colunas de *jet-grouting* armado da obra no Porto de Navegantes.**



Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações

- Tração:
  1. Carga máxima de teste: 80 tf; Deformação total: 15,94 mm.
  2. Carga de trabalho: 60 tf; Deformação total: 11,00 mm.

**Figura 25 - Resultado gráfico das provas de tração das colunas de *jet-grouting* armado da obra no Porto de Navegantes.**



Fonte: Catálogo miniJET e UWA - Tirante submerso, Costa Fortuna Engenharia de Fundações.

## 8.2 Porto de Ravena, Itália

### 8.2.1 Contexto

Em 2009, a Autoridade Portuária de Ravena (*Autorità Portuale di Ravenna*) decidiu aprofundar o berço dos cais do porto de Ravena para a profundidade de -12,00 m, visando garantir a operacionalidade do terminal diante do aumento do tráfego e tonelagem das embarcações atendidas. Para isso, foi escolhida como alternativa à cravação de novas estacas-prancha a realização de reforço no cais existente por meio da construção de tirantes submersos profundos. Essa solução resume-se, basicamente, em inserir vínculos adicionais ao paramento já existente. A técnica escolhida para construir esses vínculos foi a de tirantes de *jet-grouting* armado, realizados com a tecnologia miniJET®, e é adequada à estratigrafia do solo local, constituído de camadas de areia fina e areia siltosa.

Como a tecnologia miniJET®, desenvolvida pela empresa *Tecniwell*, ainda não havia sido utilizada para o ambiente submerso marinho, foi preciso estabelecer uma evolução técnica para o ambiente marinho da unidade robotizada e do respectivo software de controle remoto que comanda a execução do tirante. Para isso, sob a coordenação da empresa *Sapir Engineering* e amparo da Autoridade Portuária de Ravena, foi estabelecido dentro do Porto Intermodal de Ravena um campo de prova experimental, tendo como objetivo a execução, monitoramento e ensaio de tirantes

submersos realizados a partir da margem com a tecnologia *Tecniwell UWA*. O escopo do experimento foi verificar a viabilidade da solução proposta e a confiabilidade para uso na construção e reforço de cais portuário. O resultado do experimento foi publicado na reportagem *Indagine Teorico-Sperimentale su Tiranti Subacquei Realizzati con Tecnologia Under Water Anchors*, 2010.

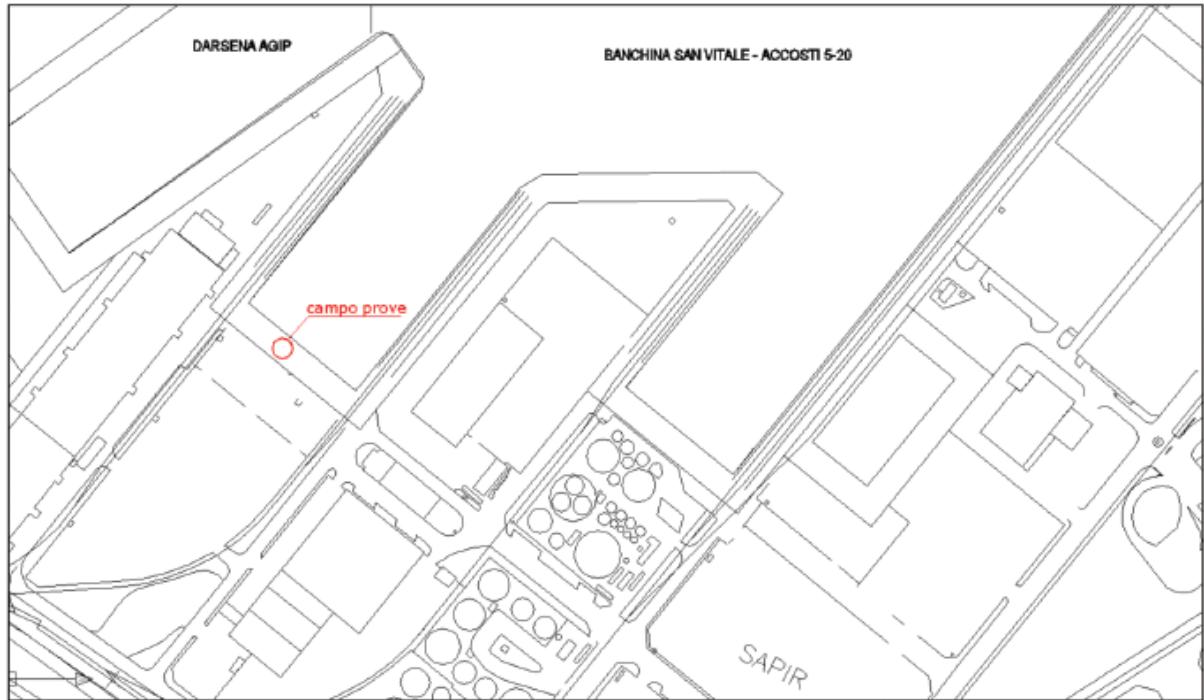
O ensaio e a verificação dos tirantes se deram correlacionando-se os esforços de tração aplicados a eles e as correspondentes deformações medidas. São comentados resultados relativos a provas com carga de trabalho de 300 kN e com carregamento nominal de ruptura dos tirantes de 630 kN. As provas foram efetuadas em sete tirantes: três realizados à cota -5,00 metros e quatro realizados à profundidade de -8,00 metros.

Na obra de reforço em si, foram realizados 890 tirantes sub-horizontais submersos com a tecnologia miniJet® UWA., totalizando um comprimento de 16.000 metros de ancoragem de reforço do paramento do cais portuário. A seguir, descrevem-se as atividades realizadas, seja para a execução dos testes em escala real, seja para a execução do reforço do paramento do cais portuário em si.

### 8.2.2 O teste em escala real

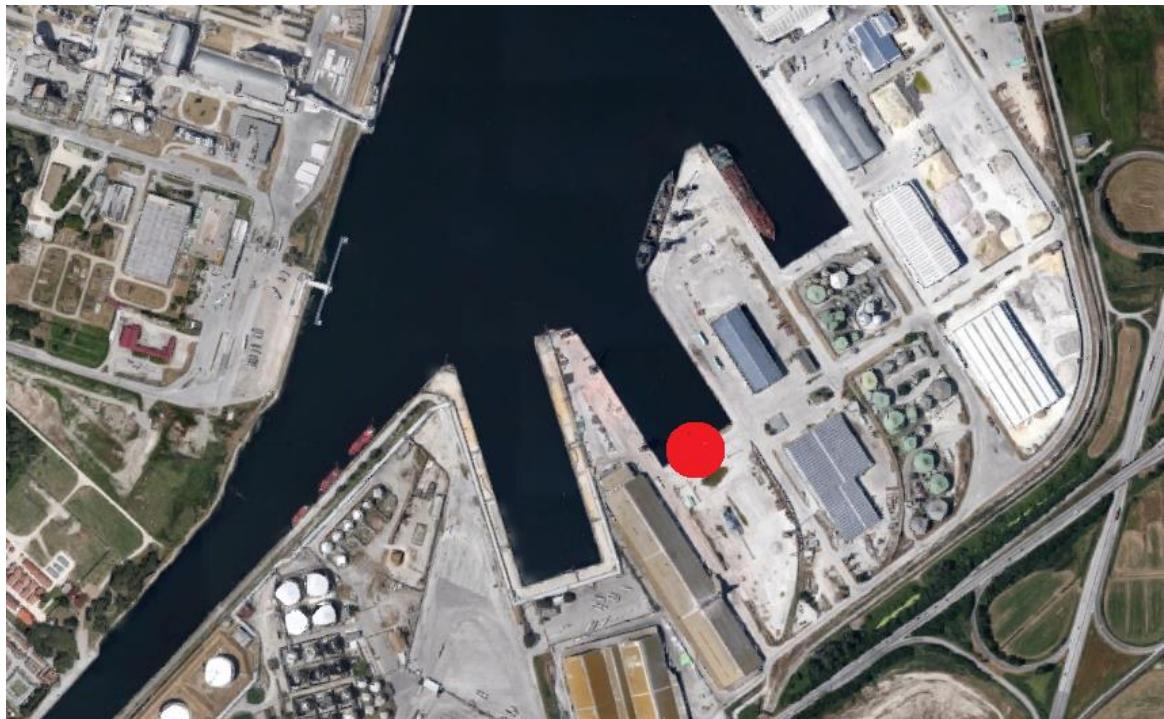
No período de junho a julho de 2010, no atracadouro número 18 da *Darsena San Vitale*, foi realizado o teste em escala real, cuja localização está indicada nas Figuras 26 e 27.

**Figura 26 - Localização do campo de prova no Porto de Ravena.**



Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

Figura 27 - Imagem de satélite do campo de provas no Porto de Ravena.



Adaptado de: GoogleMaps

A realização do teste foi possível por meio do emprego da tecnologia UWA, colocada à disposição por parte da empresa *Tecniwell S.r.l.*, que desenvolveu esse sistema de perfuração robotizado controlado remotamente. Para os ensaios do teste foram implantados sete tirantes de *jet-grouting* armado de 18 metros de comprimento, três deles a uma cota de -5,00 metros e os quatro restantes a uma cota de -8,00 metros sob o nível do mar. Na aplicação da técnica miniJET® para a construção dos tirantes de teste, foi adotada uma pressão de 400 bar para a injeção da calda de cimento, o que resultou, de acordo com o solo em questão, em bulbos de ancoragem cilíndricos com cerca de 400 mm de diâmetro.

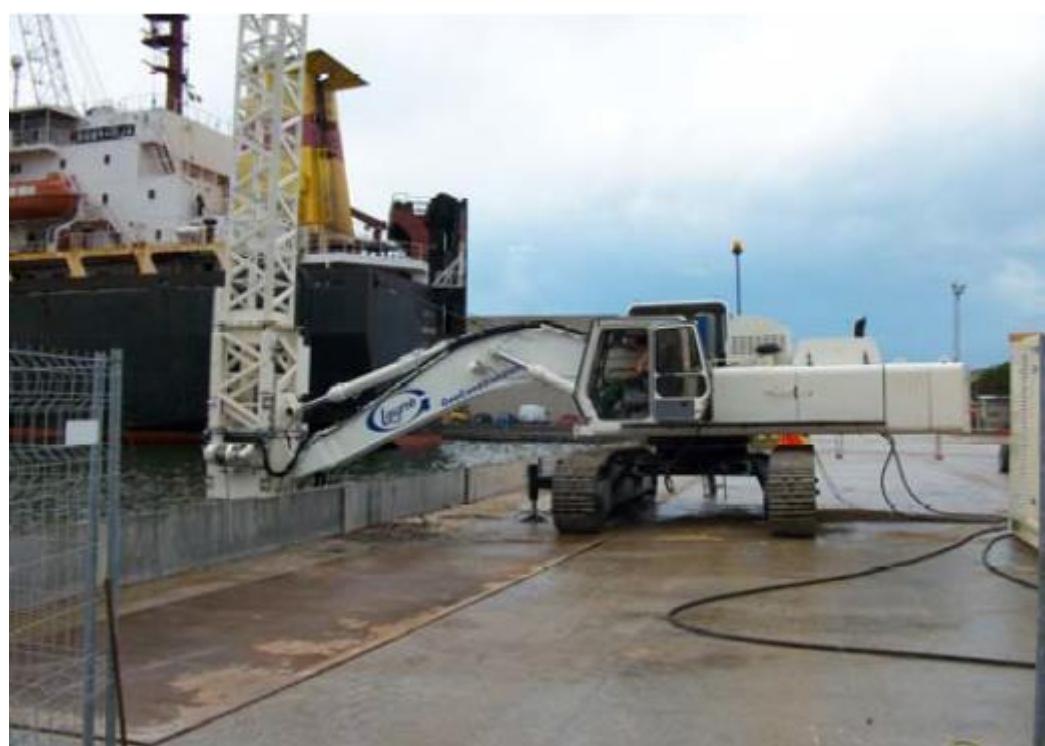
Na Figura 28 é possível ver o equipamento utilizado para a perfuração dos tirantes submersos e na Figura 29 a perfuração propriamente dita.

**Figura 28 - Célula perfuratriz utilizada para realizar os tirantes submersos de *jet-grouting* armado de prova.**



Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

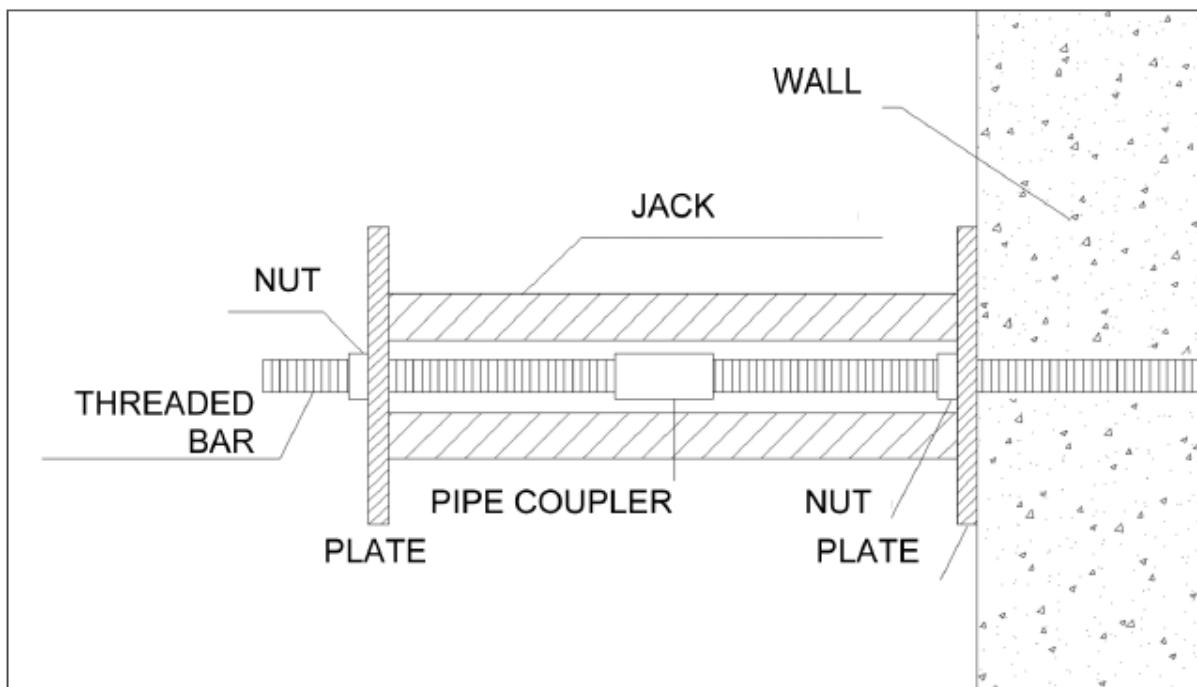
**Figura 29 - Realização dos tirantes submersos de *jet-grouting* armado de prova.**



Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

A cabeça do tirante é feita com a instalação de uma chapa zincada para a distribuição dos carregamentos, de uma proteção em polietileno com óleo do tipo marinho e um elemento de sacrifício em zinco para a proteção passiva do tirante contra as correntes de fuga. Previamente, todos os tirantes miniJET® foram protendidos a um carregamento de 100 kN por meio de um macaco hidráulico. A instalação dos tirantes de teste foi supervisionada por mergulhadores da empresa *Marine Consulting S.r.l.* Na Figura 30, tem-se uma ilustração esquemática do macaco hidráulico utilizado para a protensão dos tirantes.

**Figura 30 - Ilustração esquemática do macaqueamento hidráulico utilizado.**

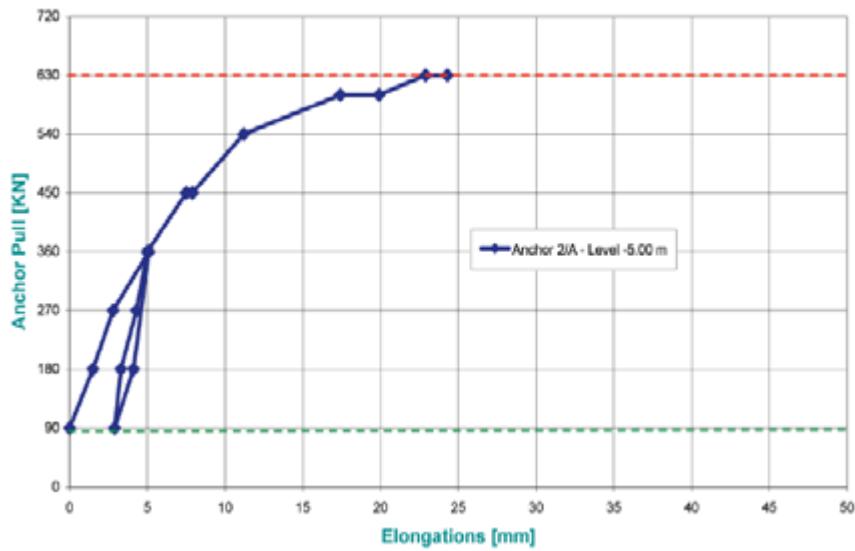


Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

Após serem realizadas no cais existente, os tirantes de *jet-grouting* armado foram submetidos a ciclos de carregamento para verificar suas compatibilidades com as exigências de projeto e com as condições litológicas locais. Os ensaios realizados obtiveram resultados positivos tanto para carga de trabalho (300 kN) como para o carregamento de ruptura das barras empregadas (barras tipo R51: 630 kN).

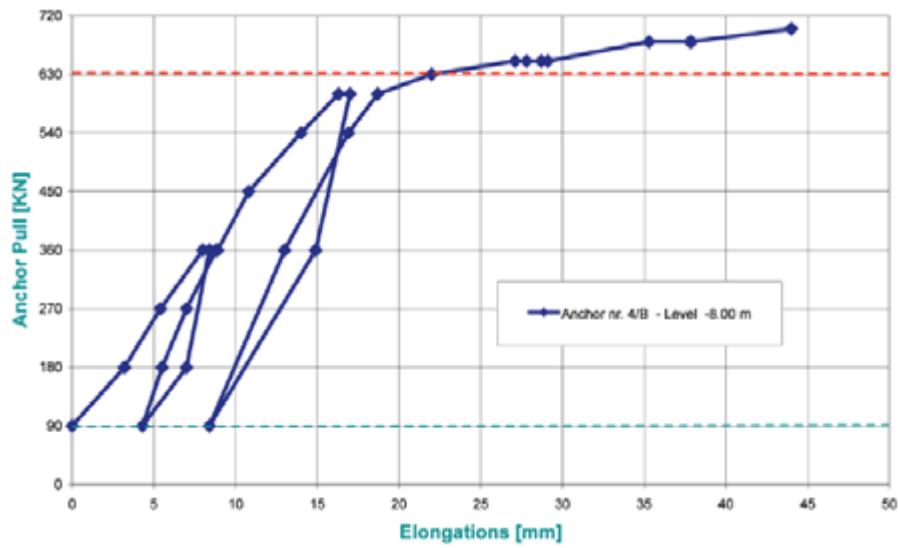
Nas Figuras 31 e 32 mostram-se os resultados de dois dos ensaios em escala real citados acima:

**Figura 31 - Ensaio carga x deformação em um dos tirantes à cota -5,00 m.**



Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

**Figura 32 - Ensaio carga x deformação em um dos tirantes à cota -8,00 m.**



Fonte: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

### 8.2.3 Obra de reforço do paramento do cais portuário

Com a validação da técnica UWA, que utiliza *jet-grouting* armado para a realização de tirantes submersos, deu-se início ao primeiro lote de obras de reforço do paramento dos cais do Porto de Ravenna, cuja localização pode ser vista na Figura 33. Esse reforço era necessário para o aprofundamento dos berços de atracação a uma cota de -12,00 metros do nível médio dos mares.

O terreno em questão é composto principalmente por areia, silte e argila, isto é, litologia típica de condições marinhas.

Os tirantes do primeiro lote, cerca de 890, foram todos realizados segundo a metodologia miniJET®, que permite o emprego contemporâneo de sistemas auto perfurantes e da técnica de injeção de *jet-grouting*. Nesse caso, foram executados tirantes para ancoragens sub-horizontais à cota de -8,00 metros e com 18,00 metros de comprimento e com um bulbo de ancoragem de cerca de 400 mm de diâmetro. Ou seja, foram executados tirantes idênticos aos do teste em escala real. As barras que formaram os tirantes e as luvas de junção foram submetidas a tratamento de zincação galvânica. Assim, a obra compreendeu a realização de 16.000 metros de ancoragem submersa.

**Figura 33 - Imagem de satélite do Porto de Ravena, com os cais do primeiro lote de obras de reforços destacados em vermelho.**



Adaptado de: GoogleMaps

Na Tabela 11, é dado um exemplo de descrição de execução de um tirante em *jet-grouting* armado, tomando como exemplo o tirante 276 do 1º lote da obra do Porto de Ravena.

**Tabela 11 - Descrição de execução do tirante em *jet-grouting* armado nº 276 do 1º lote do Porto de Ravena.**

NÚMERO DO TIRANTE	276
Progressiva	210,50 m
Cota de execução	-8,5
Data de execução	28/06/2011
Pressão da calda de cimento	340 bar
Velocidade de perfuração	100 cm/min
Velocidade de rotação da broca	600 giros/min
Velocidade de rotação da haste	12 giros/min
Hora do início da perfuração	11h05
Hora do final da perfuração	11h10
Hora do início do <i>jet-grouting</i>	11h14
Hora do final do <i>jet-grouting</i>	11h50
Data de colocação da cabeça	13/10/2011
Data do tracionamento	11/01/2011
Anotações sobre o <i>jet-grouting</i>	execução regular
Anotações sobre o tracionamento	colocação da trava do macaco hidráulico de tracionamento durante a primeira etapa

Adaptado de: *Under Water Anchor S.r.l. Brochure*

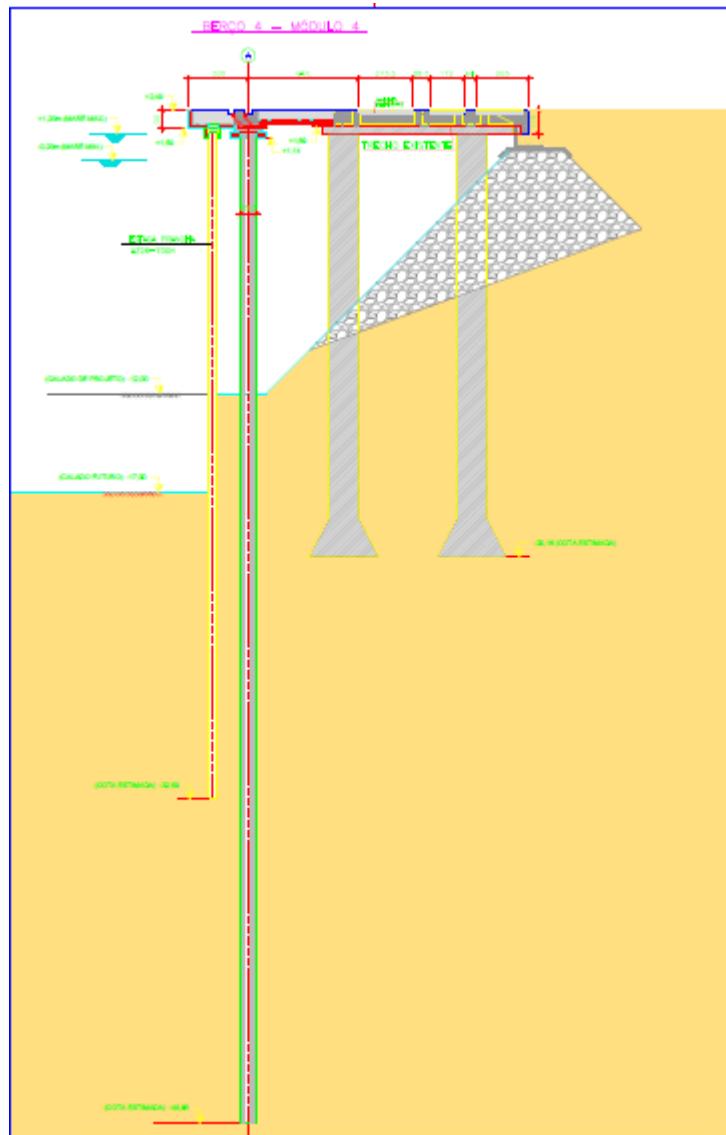
## 9 ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE *JET-GROUTING* ARMADO

### 9.1 Estrutura atual do cais do Porto de Navegantes

Analizando primeiramente a atual situação do cais, simulou-se o comportamento da estrutura existente, caso fosse feito o rebaixamento da cota de dragagem sem nenhum reforço adicional. Para isso, foram necessárias algumas simplificações da situação real devido às limitações do software.

Como o Plaxis Introductory® permite a utilização de apenas um material para os elementos de placa (elemento estrutural), foi necessário considerar os elementos existentes adotando uma rigidez média, em termos dos produtos  $E^*A$  e  $E^*I$ , que caracterizasse o melhor possível a situação real. Ao todo, são quatro elementos diferentes no problema real: a laje do cais, os tubulões, a estaca de alívio do trilho do portainer e a estaca-prancha. Com o acréscimo das colunas de *jet-grouting* como reforço, tem-se o quinto elemento. A seção transversal do cais do porto e seus elementos podem ser vistos na Figura 34.

**Figura 34 - Seção transversal do cais do Porto de Navegantes.**



Outro aspecto que exigiu uma simplificação foi o fato de alguns elementos serem espaçados, como os tubulões e as estacas de alívio. Para o cálculo da rigidez desses elementos, foi primeiramente determinada a rigidez de cada elemento, e em seguida distribuída ao longo de seu espaçamento, dessa forma obtendo uma rigidez por unidade de comprimento, semelhante aos elementos contínuos.

Para transformar a rigidez de todos esses elementos num único valor foi feita uma média das rigidezes por unidade de comprimento, sendo esse valor adotado para o cálculo no Plaxis®.

Para o cálculo do peso próprio das estruturas foi adotada a mesma metodologia, calculando-se o peso por unidade de comprimento, sendo os elementos discretos distribuídos pelo seu espaçamento, e calculada a média entre eles.

Para a análise foi adotado:

- $E_{concreto} = 21 \text{ GPa}$
- $\gamma_{concreto} = 25 \text{ KN/m}^3$

□  $E_{aço} = 200 \text{ GPa}$

Os tubulões têm um espaçamento de 6 metros e diâmetro de 1,5 m, sendo estruturas de concreto armado. Dessa forma, calcula-se:

$$(EA)_{tubulão} = 21000000 * (\pi * 0,75^2)/6 = 5.895.000 \text{ KN/m}$$

$$(EI)_{tubulão} = 21000000 * (\pi * \frac{0,75^4}{4})/6 = 828.350 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

$$w_{tubulão} = 25 * (\pi * 0,75^2)/6 = 7,36 \text{ KN/m/m}$$

As estacas de alívio são estacas pré-moldadas de concreto, de seção vazada, têm um espaçamento de 4 metros, diâmetro externo de 0,80 m e diâmetro interno de 0,30 m. Sua rigidez e peso próprio são, portanto:

$$(EA)_{estaca} = 21000000 * [\pi * (0,4)^2 - \pi * (0,15)^2]/4 = 2.267.837 \text{ KN/m}$$

$$(EI)_{estaca} = 21000000 * [\pi * \frac{(0,4 - 0,15)^4}{4}]/4 = 16.107 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

$$w_{estaca} = 25 * (\pi * 0,375^2)/4 = 2,76 \text{ KN/m/m}$$

A laje do cais é um elemento contínuo, também de concreto armado, de espessura de 0,75 m. Portanto, sua rigidez e peso próprio foram calculados considerando-se uma largura de 1 metro, obtendo-se dessa forma:

$$(EA)_{laje} = 21000000 * (0,75 * 1) = 15.000.000 \text{ KN/m}$$

$$(EI)_{laje} = 21000000 * \left(\frac{0,75 * 1^3}{12}\right) = 1.250.000 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

$$w_{laje} = 25 * 1 * 0,75 = 18,75 \text{ KN/m/m}$$

Para a estaca-prancha, os valores de área e momento de inércia são fornecidos em catálogo já com seus valores por unidade de comprimento. O modelo da estaca-prancha existente no cais é o AZ 26-700. Assim, seus valores de rigidez e peso próprio são:

$$A = 0,1872 \text{ m}^2/\text{m} \quad (EA)_{prancha} = 37.440.000 \text{ KN/m}$$

$$I = 0,0005972 \text{ m}^4/\text{m} \quad (EI)_{prancha} = 119.440 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

$$w_{prancha} = 1,38 \text{ KN/m/m}$$

Por fim, calculando-se a média das rigidezes e peso próprio dos elementos (considerando que existem duas linhas de tubulões na seção transversal), tem-se:

$$(EA)_{média} = \frac{[2 * (EA)_{tubulão} + (EA)_{estaca} + (EA)_{laje} + (EA)_{prancha}]}{5}$$

$$= 13.300.000 \text{ KN/m}$$

$$(EI)_{média} = \frac{[2 * (EI)_{tubulão} + (EI)_{estaca} + (EI)_{laje} + (EI)_{prancha}]}{5} = 620.760 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

$$w_{média} = \frac{[2 * w_{tubulão} + w_{estaca} + w_{laje} + w_{prancha}]}{5} = 7,522 \text{ KN/m/m}$$

Essas são as características mecânicas adotadas para os elementos de placa na análise em elementos finitos. No modelo, é adotado para a cortina de colunas de jet-grouting armado secantes os mesmos valores médios de E\*A e E\*I. Dessa forma, todos os elementos da seção transversal possuem a mesma rigidez no modelo, o que é uma simplificação com potencial de afetar muito o resultado da análise.

Para análise dos resultados obtidos no modelo em elementos finitos, no que se refere aos diagramas de esforços na estaca-prancha, sabe-se que a estaca-prancha presente na estrutura no cais é a AZ 26-700. Consultando o Catálogo Geral 2014 de Estacas-Prancha Laminadas a Quente, da ArcelorMittal®, para a AZ 26-700, obtém-se os dados apresentados na Tabela 12:

**Tabela 12 - Características físicas e mecânicas do perfil AZ 26-700.**

Tensão de escoamento ( $\sigma$ )	210 MPa
Cisalhamento ( $\zeta$ )	125 MPa
Módulo de flexão (W)	2600 cm <sup>3</sup> /m
Espessura (b)	1,22 cm
Momento Estático (S)	1535 cm <sup>3</sup> /m
Momento de Inércia (I)	59720 cm <sup>4</sup> /m

Fonte: Catálogo Geral 2014 de Estacas-Prancha Laminadas a Quente, da ArcelorMittal®.

Com os dados acima, obtém-se que o momento último na estaca-prancha é 546 kN.m.

$$M = \sigma * W = 210 \text{ MPa} * 2600 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}} = 546 \text{ kN.m/m}$$

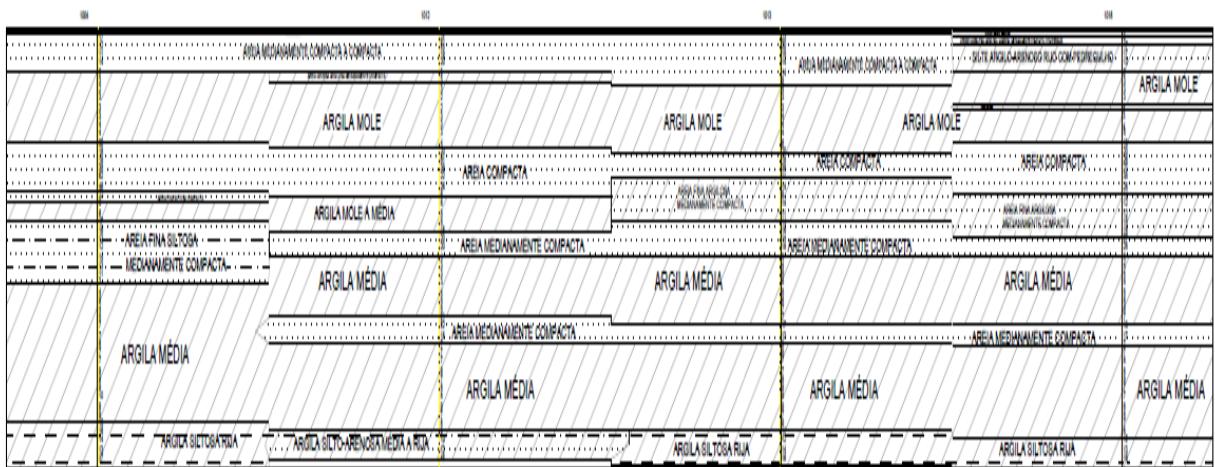
Obtém-se, também, que a força cortante máxima na estaca-prancha é 593 kN/m.

$$V = \tau * b * \frac{I}{S} = 125 \text{ MPa} * 1,22 \text{ cm} * \frac{59720 \text{ cm}^4}{1535 \text{ cm}^3} = 593 \text{ kN/m}$$

## 9.2 Caracterização do solo local

Outro aspecto que exigiu simplificação foi a caracterização do solo. De acordo com o perfil geotécnico levantado, o solo é composto de camadas intercaladas de argila e areia, conforme pode ser visto na Figura 35.

**Figura 35 - Perfil geotécnico do Porto de Navegantes.**



Além disso, o talude da seção transversal foi construído com enrocamento de matacões, visando à realização de um talude mais íngreme do que o possível com o solo natural local. Essa variação do solo não foi possível de simular no Plaxis®, pois o software admite um tipo de solo somente em cada análise.

Esse problema foi abordado da seguinte forma: primeiramente, foi ignorada a presença dos matacões no talude. Essa simplificação é a favor da segurança, visto que, na situação real, esses elementos atuam a favor da estabilidade do talude devido ao seu maior ângulo de atrito, além de solicitar por gravidade a resistência das areias das camadas logo abaixo.

Assim, a análise foi feita, em cada situação de intervenção e solicitação, para dois tipos de solos: argila e areia. A análise dos resultados para cada solo e a comparação entre os dois casos pautaram o julgamento da admissibilidade e conveniência de cada arranjo estrutural do cais portuário.

Os parâmetros dos solos utilizados nos modelos foram obtidos por meio de consulta da literatura. Os parâmetros adotados estão descritos na Tabela 13 (Solos do litoral de São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (argila); Lambe & Whitman, *Mecánica de suelos*, pág. 173 (areia)):

**Tabela 13 - Parâmetros de solo médio utilizados na análise em elementos finitos.**

<b>Argila</b>		<b>Areia</b>	
<b>E</b>	1 MPa	<b>E</b>	15 MPa
<b>v</b>	0,25	<b>v</b>	0,25
<b>K</b>	$10^{-7}$ m/s	<b>K</b>	$10^{-4}$ m/s
<b><math>\phi'</math></b>	24°	<b><math>\phi'</math></b>	30°
<b>c'</b>	0	<b>c'</b>	0

<b>u</b>	0		<b>u</b>	-
<b>ko</b>	0,6		<b>ko</b>	0,5
<b>Su</b>	$15+1,6^*z$		<b>Su</b>	-

Na Tabela 13, **E** corresponde ao módulo elástico do solo (Módulo de Young), **v** é o coeficiente de Poisson, **K** é o coeficiente de permeabilidade,  **$\Phi'$**  é o ângulo de atrito do material, **c'** é a coesão efetiva, **u** é a pressão neutra, **ko** é o coeficiente de empuxo horizontal do solo e **Su** é a resistência não-drenada do solo.

### 9.3 Solicitações ao cais portuário

O objetivo de aprofundar o berço de atracação em um cais portuário é, claramente, operar navios maiores na instalação portuária. Além das mudanças geotécnicas, como alteração de taludes, escavações e dragagens, há uma mudança nas cargas de serviço da plataforma e retroporto, pois para atender navios maiores, equipamentos maiores são necessários, maior volume de estocagem é necessária, e assim por diante.

No caso dos portaineres, que são os guindastes usados para carregar e descarregar os contêineres dos navios, a existência de uma linha de estacas de alívio na plataforma portuária, exatamente sob o trilho dos portaineres, faz com que o peso desses equipamentos seja transferido diretamente para camadas inferiores do solo, de forma que a sobrecarga desses equipamentos (e a mudança de seu valor) não precise ser considerada no nosso modelo. Isso porque o peso do portainer não influencia o equilíbrio geotécnico do solo e paramento de contenção (estaca-prancha, no caso). A única influência desse esquema estrutural é o fato da estaca de alívio atravessar a superfície de ruptura e dessa forma atuar de forma a contê-la. Essa interferência a favor da segurança ocorre tanto no caso da instabilidade global (visto o grande comprimento da estaca, que atinge a cota -49 m) como da instabilidade local próxima à estaca-prancha (visto a proximidade entre as duas estacas: 1,2 metros). Devido a sua importância no equilíbrio geotécnico, essa influência é considerada no nosso modelo.

No caso da estocagem no retroporto (lembrando que o Porto de Navegantes é especializado em contêineres), o aumento do tamanho dos navios também aumenta a demanda por estocagem de contêineres. Esse aumento pode acontecer de três formas: aumento da área de estocagem ou aumento do empilhamento dos contêineres ou ambas as formas em conjunto. O contêiner padrão possui capacidade de ser empilhado em seis unidades, entretanto, por motivos de melhoria do desempenho operacional, costumam ser empilhados em, no máximo, quatro unidades: essa variável depende do equipamento de empilhar utilizado pelo operador portuário. De qualquer forma, deve-se sempre projetar levando-se em consideração a situação crítica: seis contêineres.

Assim, para a definição da carga no retroporto, temos:

- pilha de seis contêineres;
- peso médio de um contêiner completamente preenchido: 28 toneladas;

- fator de concomitância: 0,8 (nem todos os contêineres estão com carga máxima);
- espaçamento médio entre contêineres: 30 cm;
- medidas de um contêiner de 1 TEU:
  - comprimento: 6,058 metros
  - largura: 2,438 metros
  - altura: 2,591 metros

Assim, a carga no retroporto é calculada:

$$\frac{6*28*0,8}{(6,058+0,3) * (2,438+0,3)} = 77,2 \text{ kN/m}^2$$

Entretanto, levando-se em consideração as faixas de circulação de 15 metros de largura e carga de  $20 \text{ kN/m}^2$ , buscando-se adotar uma carga única para todo o conjunto plataforma-retroporto, é razoável adotar a carga homogênea de  $50 \text{ kN/m}^2$ .

## 9.4 Modelo em solo arenoso

Nessa seção é analisado o modelo inspirado no Porto de Navegantes com o solo homogêneo arenoso, para as situações sem intervenção (antes e depois do aprofundamento de calado), com intervenção somente por colunas de *jet-grouting*, com intervenção somente por tirante miniJet®, e com intervenção mista de colunas *jet-grouting* e tirantes miniJET®.

Para cada situação de intervenção, é mostrada uma imagem do modelo no software Plaxis Introductory® e diagramas de deformação horizontal na estaca-prancha e de esforços solicitantes na estaca-prancha (momento fletor e força cortante).

O objetivo de cada análise é obter o diagrama de deslocamentos, esforço momento e esforço cortante cortante na estaca-prancha. Por fim, obtém-se o fator de segurança por meio do método *phi-c reduction* do software Plaxis Introductory. É importante salientar também que a situação inicial considerada no modelo é a situação atual do cais construído, ou seja, não foi feita uma análise da evolução histórica das tensões no solo.

### 9.4.1 Sem intervenção

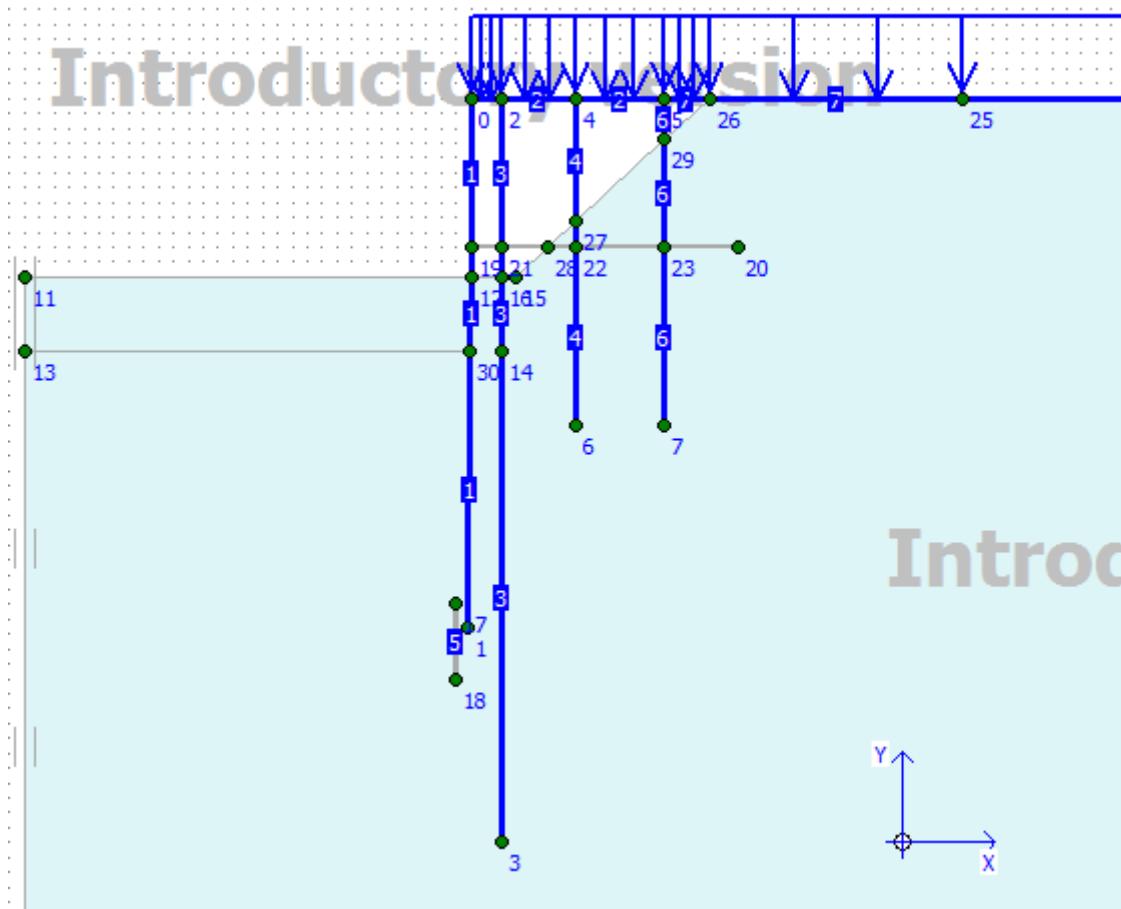
Nessa seção são comparados os modelos do cais portuário do Porto de Navegantes com os atuais 12 metros de profundidade e com a profundidade futura de 17 metros, ambos os modelos na situação em que não há intervenção estrutural alguma em relação ao arranjo estrutural já existente.

No modelo que simula a situação sem intervenção estrutural, foram adotadas cinco placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, além de uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, como pode ser visto nas Figuras 36 e 40.

Por limitação da versão introdutória do Plaxis®, utilizada neste trabalho, todas as placas possuem as mesmas características mecânicas já calculadas. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto.

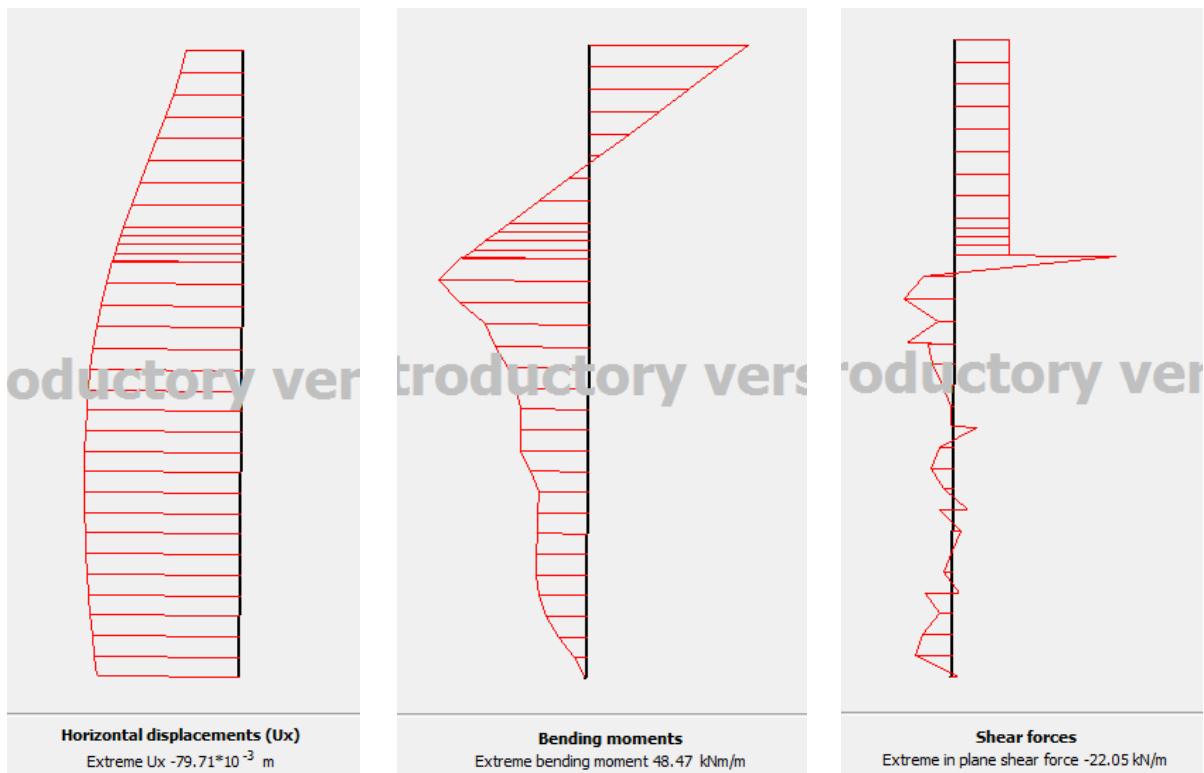
- Sem intervenção, berço com o calado de projeto de 12 metros:

**Figura 36 – Modelo em solo arenoso, calado de projeto, sem intervenção estrutural.**



Nas Figura 37, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 37 - Deformações horizontais, momento e força cortante na estaca-prancha para calado de projeto e sem intervenção – solo arenoso.**

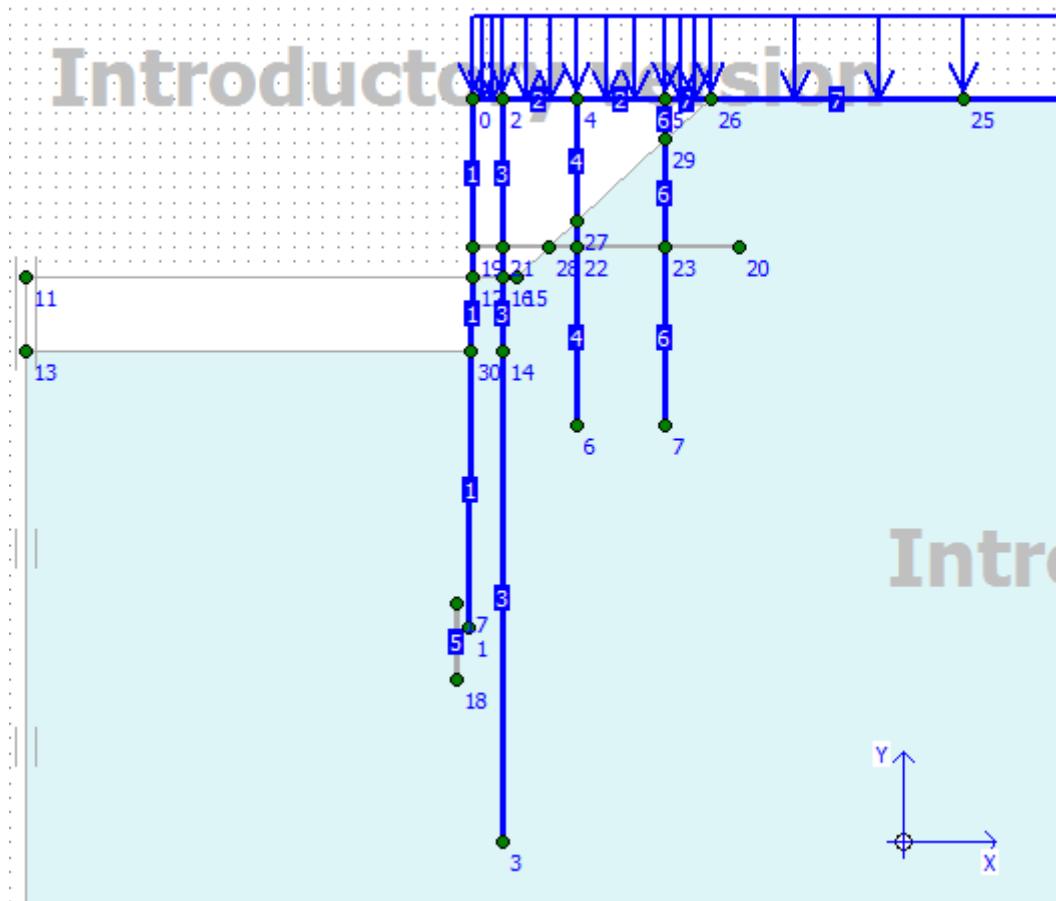


O fator de segurança para a situação de calado de projeto sem intervenção é 1,140. Esse fator de segurança é muito baixo, porém ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real, pois, como será visto adiante, esse fator de segurança é compensado por um fator de segurança bem mais alto no caso da análise em solo homogêneo argiloso.

O deslocamento horizontal máximo, de 8 cm, ocorre ao pé da estaca-prancha, e o deslocamento horizontal no topo é de menos de 4 cm, valor aceitável na prática. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 48 kN.m/m, é muito menor que o momento último (546 kN.m/m). O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 22 kN/m, é muito menor que a cortante última (593 kN/m).

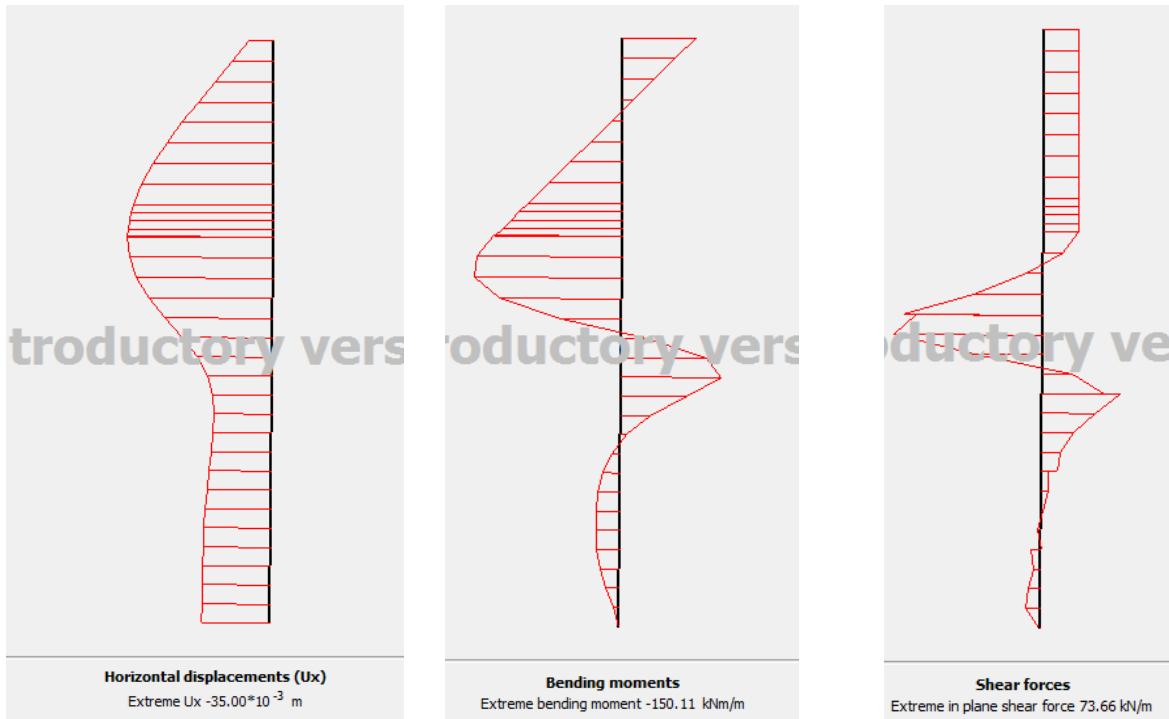
- Sem intervenção, berço com o calado futuro de 17 metros:

**Figura 38 - Modelo em solo arenoso, calado futuro, sem intervenção estrutural.**



Nas Figura 39, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 39 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha para calado futuro e sem intervenção – solo arenoso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro sem intervenção é 1,149. É estranha a relação entre esse valor e o fator de segurança obtido para a profundidade de 12 metros sem intervenção (1,140), pois é de se esperar que com o aprofundamento do calado o fator de segurança diminua. A não ocorrência desse fato pode ser devido ao grande comprimento da estaca-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que um aprofundamento de 5 metros altere pouco o equilíbrio entre empuxos passivo e ativo.

Apesar de o fator de segurança ser baixo, muito próximo a 1, ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real pois, como será visto adiante, esse fator de segurança é compensado por um fator de segurança bem mais alto no caso da análise em solo homogêneo argiloso.

O deslocamento horizontal máximo, de 3,5 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha, e o deslocamento horizontal no topo é de menos de 1 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 150 kN.m/m, é menor que o momento último (546 kN.m/m). O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 74 kN/m, é muito menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 12 metros sem intervenção estrutural, é interessante notar que o momento fletor e a força cortante máximos na estaca-prancha aumentam como era de se esperar. Entretanto, o deslocamento horizontal máximo neste caso de 17 metros de calado sem intervenção é menor do que aquele obtido para 12 metros (3,5 centímetros contra 8 centímetros). Porém, a posição na

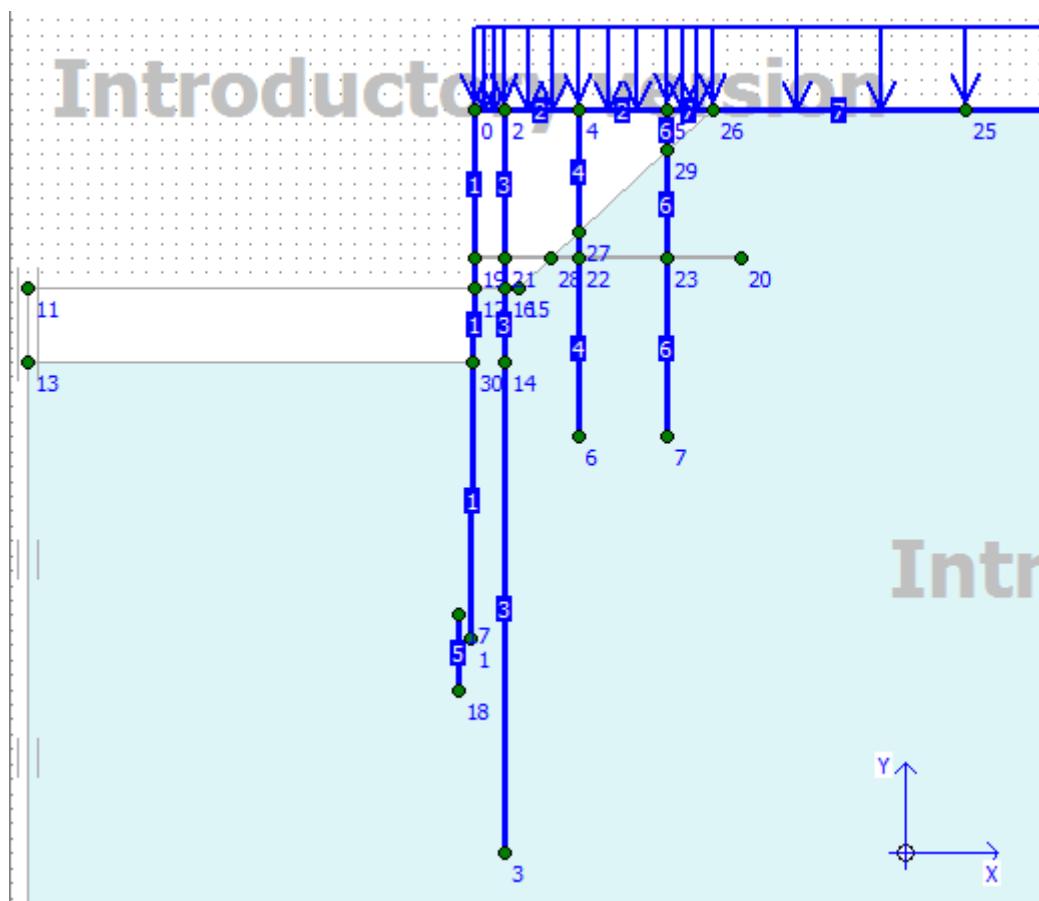
estaca-prancha desses deslocamentos máximos é diferente, como pode ser visto na figura acima.

#### 9.4.2 Somente intervenção vertical: colunas de *jet-grouting* armado

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com a profundidade de 17 metros na situação em que a intervenção estrutural no cais é somente a realização de colunas de *jet-grouting* armado, de 5 metros de comprimento, junto à ponta da estaca-prancha.

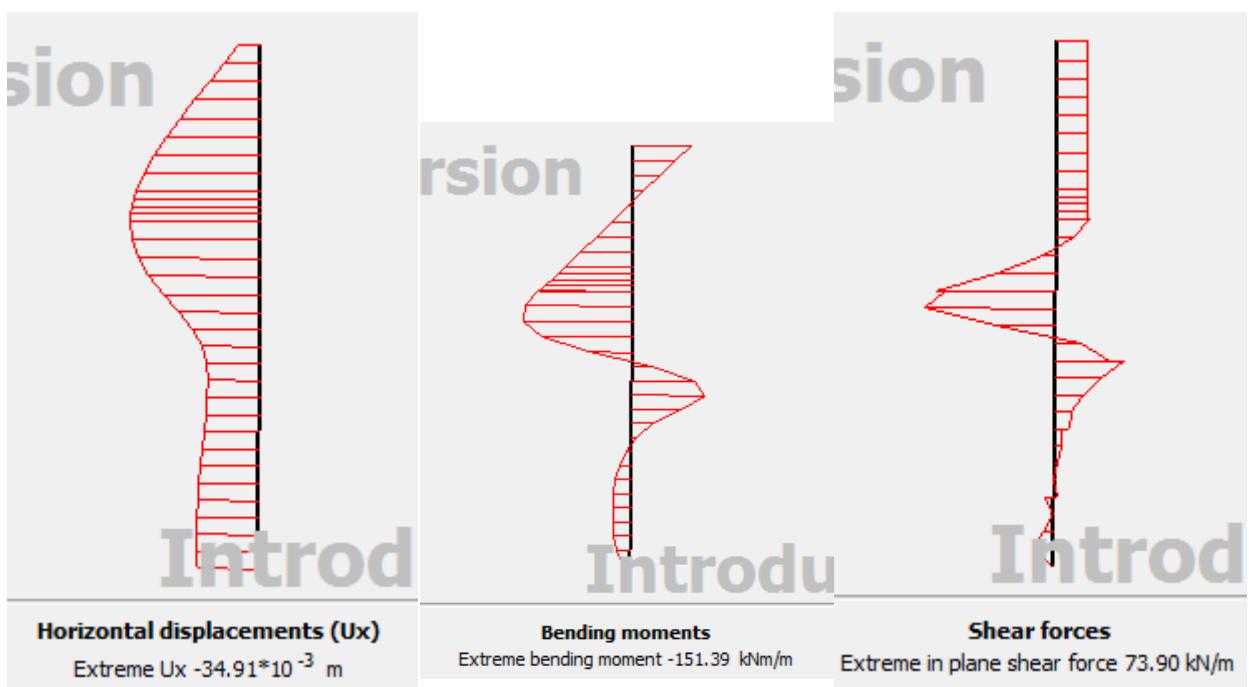
No modelo que simula a situação com a intervenção estrutural somente com colunas de *jet-grouting* armado, foram modeladas seis placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e, claro, uma placa vertical que simula as colunas de *jet-grouting* armado, como pode ser visto na Figura 44. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto.

**Figura 40 - Modelo em solo arenoso com intervenção vertical.**



Abaixo, tem-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 41 - Deslocamentos horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção vertical – solo arenoso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção vertical é 1,153.

Nota-se que esse fator de segurança é praticamente o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (1,149), o que evidencia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais em solo arenoso. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que o aumento da ficha da estaca-prancha em cinco metros não altere em quase nada o equilíbrio geotécnico. O fato das estacas de alívio, situadas apenas 1,20 metros de distância da estaca-prancha, atingirem cota muito mais profunda reforça essa hipótese, visto que as colunas de *jet-grouting* são realizadas ao pé da estaca-prancha.

Apesar de o fator de segurança ser baixo, muito próximo a 1, ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real pois, como será visto adiante, esse fator de segurança é compensado por um fator de segurança bem mais alto no caso da análise em solo homogêneo argiloso.

O deslocamento horizontal máximo, de 3,5 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é menor que 1 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 150 kN.m/m, é menor que o momento último (546 kN.m/m). O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 74 kN/m, é muito menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se

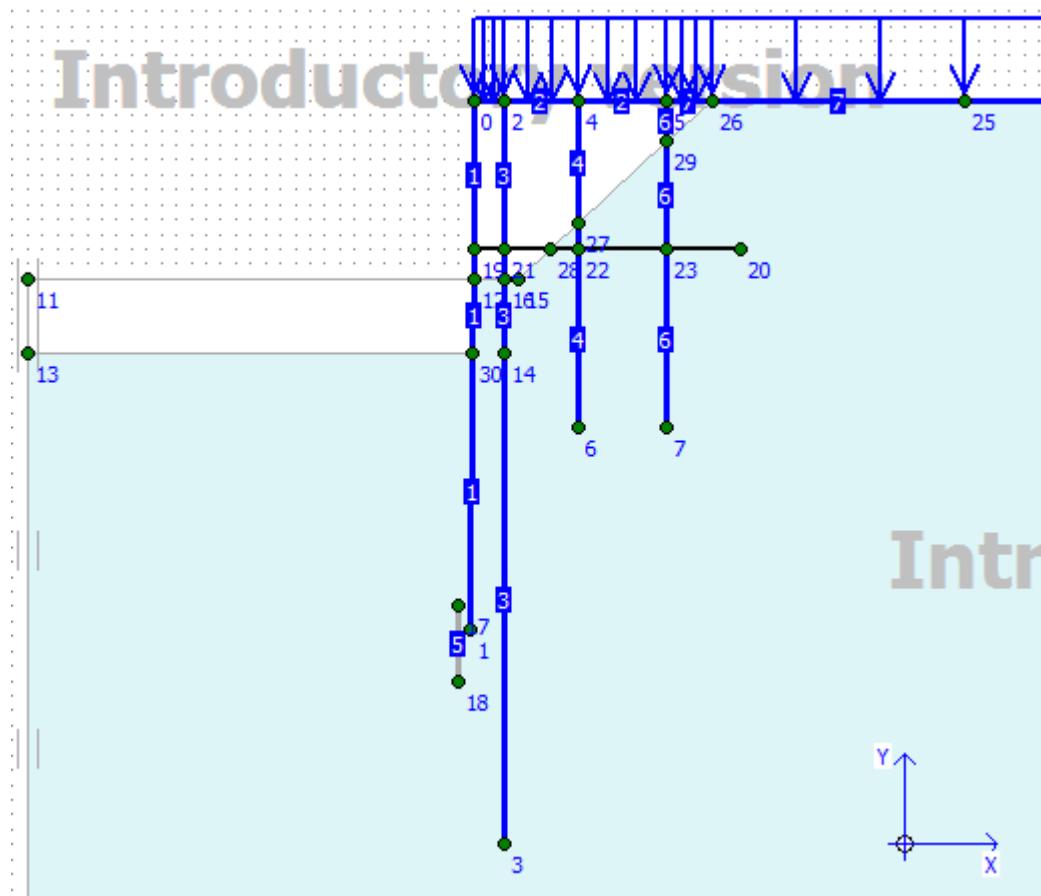
que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostra que as colunas de *jet-grouting* armado de cinco metros de comprimento aos pés da estaca-prancha têm pouca eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo, o Porto de Navegantes. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso é o comprimento das estacas-prancha e de alívio.

#### 9.4.3 Somente intervenção horizontal: tirante miniJET®

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com o calado futuro na situação em que a intervenção estrutural no cais é somente a realização de tirantes miniJET®, de 18 metros de comprimento (como no caso do Porto de Ravena), a uma cota de -10 metros. Foi adotada uma distância entre tirantes de 3 metros.

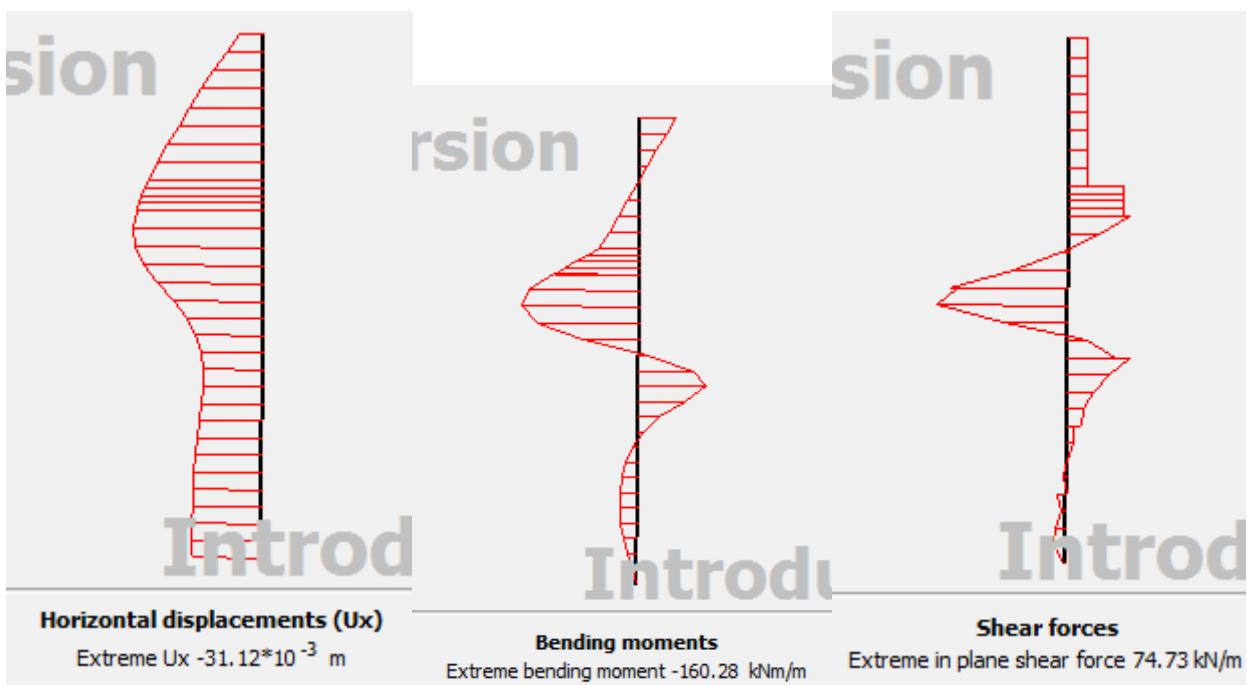
Assim, foram modeladas cinco placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e, claro, um tirante que simula o miniJET®, como pode ser visto na Figura 48. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto.

**Figura 42 - Modelo em solo arenoso com intervenção horizontal.**



Nas Figura 43, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 43 - Deslocamentos horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção horizontal – solo arenoso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção horizontal é 1,153.

Nota-se que esse fator de segurança é praticamente o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (1,149), o que evidencia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais em solo arenoso. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que o atritamento da estaca-prancha não altere em quase nada o equilíbrio geotécnico.

Apesar de o fator de segurança ser baixo, muito próximo a 1, ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real pois, como será visto adiante, esse fator de segurança é compensado por um fator de segurança bem mais alto no caso da análise em solo homogêneo argiloso.

O deslocamento horizontal máximo, de 3,1 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é menor que 1 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 160 kN.m/m, é menor que o momento último (546 kN.m/m). O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 74 kN/m, é muito menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostra que os tirantes miniJET® de 18 metros de comprimento, a uma cota de -10 metros, espaçados três metros entre si, têm pouca eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo, o Porto de Navegantes. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso é o

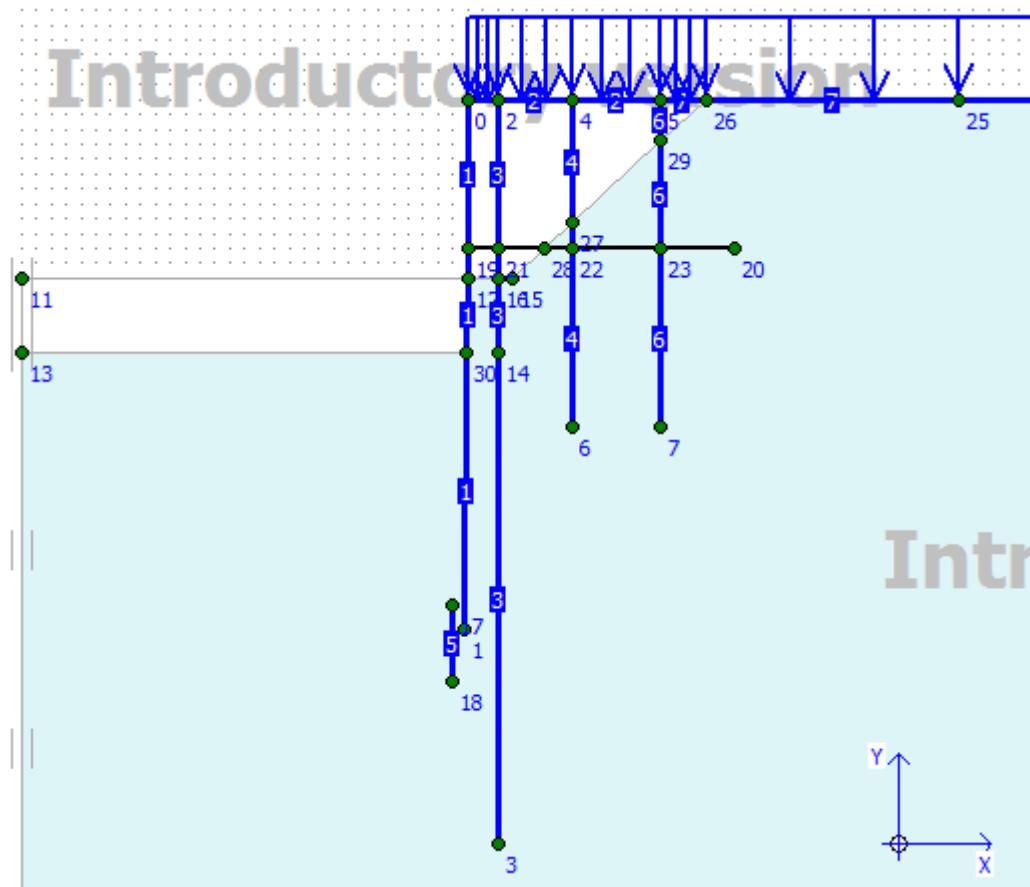
comprimentos das estacas-prancha e de alívio. É interessante notar, também, a proximidade de valores e forma dos diagramas de deslocamento horizontal e esforços solicitantes entre as situações com somente colunas de *jet-grouting* e somente tirantes miniJET®, outro fato que reforça a conclusão de ineficiência da intervenção para o cais em questão.

#### 9.4.1 Intervenção mista: colunas de *jet-grouting* e tirantes miniJET®

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com a profundidade de 17 metros na situação em que a intervenção estrutural no cais é feita tanto com a realização de colunas de *jet-grouting* armado de cinco metros de comprimento ao pé da estaca-prancha, como por tirantes miniJET® de 18 metros de comprimento (como no caso do Porto de Ravena), a uma cota de -10 metros. Foi adotada uma distância entre tirantes de três metros.

Assim, foram modeladas seis placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e uma placa que simula a linha de colunas de *jet-grouting* armado. Foi também colocado no modelo um tirante que simula o miniJET®. Além disso, no modelo consta o carregamento de 50 kN/m<sup>2</sup>, que representa a carga na plataforma e retroporto, conforme está ilustrado na Figura 52.

**Figura 44 - Modelo em solo arenoso com intervenção estrutural mista.**



Nas Figura 45, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 45 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção mista – solo arenoso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção estrutural mista é 1,149.

Nota-se que esse fator de segurança é o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (1,149), o que evidencia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais em solo arenoso. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que o aumento da ficha da estaca-prancha em 5 metros não altere em quase nada o equilíbrio geotécnico. O fato de as estacas de alívio, situadas a 1,20 metros de distância da estaca-prancha, atingirem cota muito mais profunda reforça essa hipótese, visto que as colunas de *jet-grouting* são realizadas ao pé da estaca-prancha.

Apesar de o fator de segurança ser baixo, muito próximo a 1, ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real pois, como será visto adiante, esse fator de segurança é compensado por um fator de segurança bem mais alto no caso da análise em solo homogêneo argiloso.

O deslocamento horizontal máximo, de 3,1 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é menor que 1 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 161 kN.m/m, é menor que o momento último (546 kN.m/m). O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 75 kN/m, é muito menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostra a intervenção mista tem pouca

eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo, o Porto de Navegantes. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso é o comprimento das estacas-prancha e de alívio. É interessante notar, também, a proximidade de valores e forma dos diagramas de deslocamento horizontal e de esforços solicitantes entre os três tipos de intervenção estrutural estudados, outro fato que reforça a hipótese de ineficiência da intervenção para o cais em questão.

## 9.5 Modelo em solo argiloso

Nessa seção é analisado o modelo inspirado no Porto de Navegantes como o solo homogêneo argiloso, para as situações sem intervenção (antes e depois do aprofundamento de calado), com intervenção somente por colunas de *jet-grouting*, com intervenção somente por tirante miniJET®, e com intervenção mista de colunas *jet-grouting* e tirantes miniJET®. Interessante relembrar que, segundo a bibliografia consultada, o coeficiente de empuxo horizontal do solo é 0,6 (Solos do litoral de São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos).

Para cada situação de intervenção, é mostrada uma imagem do modelo no software Plaxis Introductory® e diagramas de deformação horizontal na estaca-prancha e de esforços solicitantes na estaca-prancha (momento fletor e força cortante).

O objetivo de cada análise é obter o diagrama de deslocamentos, esforço momento e esforço cortante cortante na estaca-prancha. Por fim, obtém-se o fator de segurança por meio do método *phi-c reduction* do software Plaxis Introductory. É importante salientar também que a situação inicial considerada no modelo é a situação atual do cais construído, ou seja, não foi feita uma análise da evolução histórica das tensões no solo.

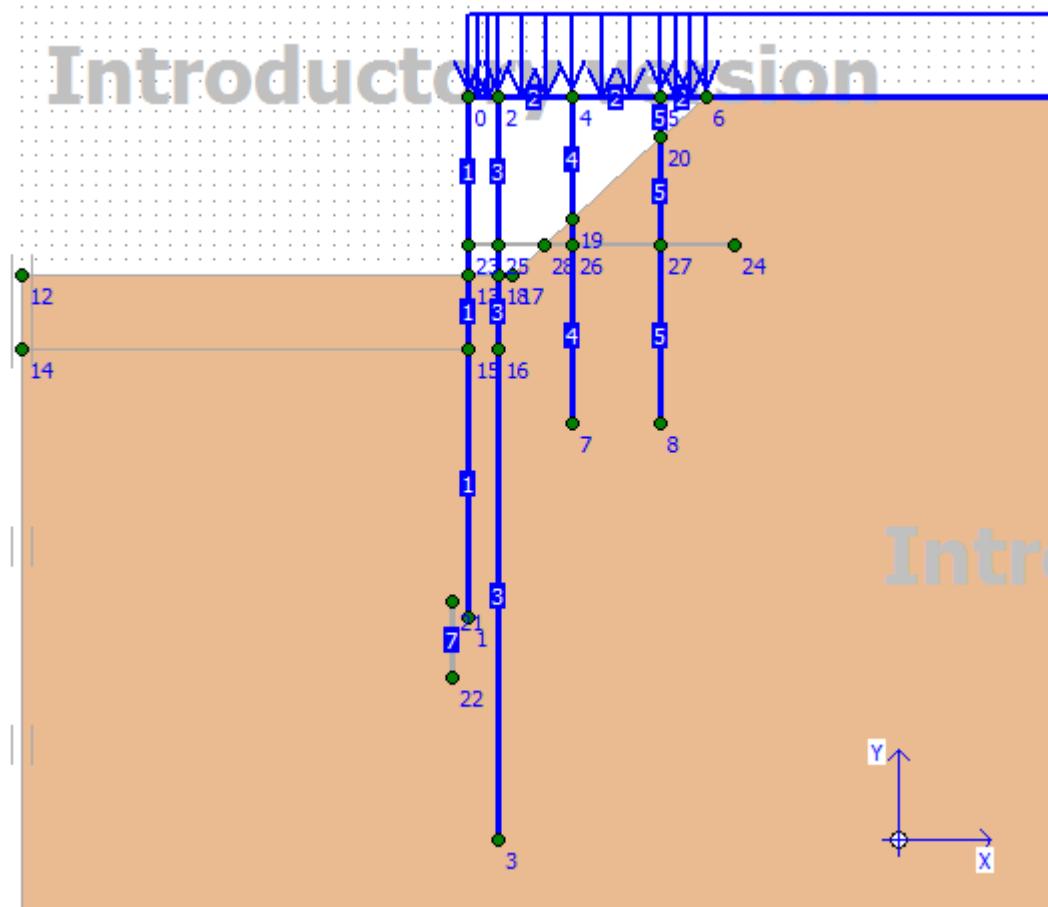
### 9.5.1 Sem intervenção

Nessa seção são comparados os modelos do cais portuário do Porto de Navegantes com os atuais 12 metros de profundidade e com a profundidade futura de 17 metros, ambos os modelos na situação em que não há intervenção estrutural alguma em relação ao arranjo estrutural já existente.

No modelo que simula a situação sem intervenção estrutural, foram adotadas cinco placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, além de uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, como pode ser visto nas Figuras 56 e 60. Por limitação da versão introdutória do Plaxis®, utilizada neste trabalho, todas as placas possuem as mesmas características mecânicas já calculadas. Além disso, no modelo consta o carregamento de 50 kN/m<sup>2</sup>, que representa a carga na plataforma e retroporto.

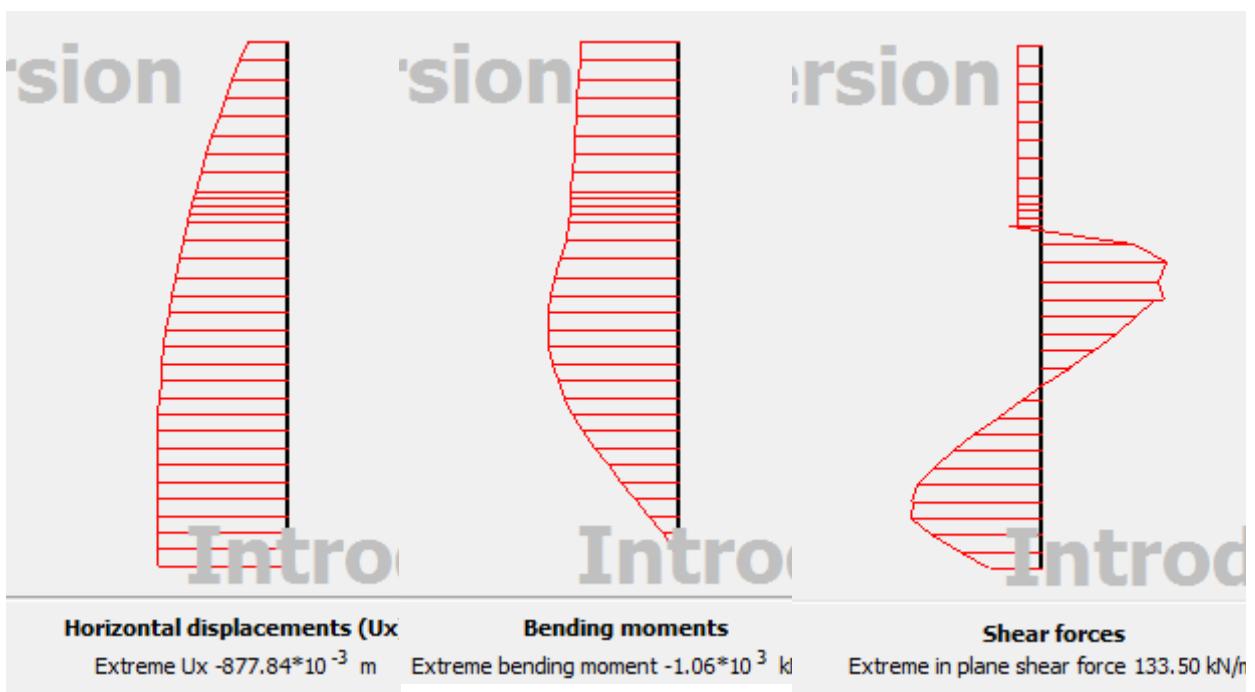
- Sem intervenção, berço com o calado de projeto de 12 metros:

Figura 46 - Modelo em solo argiloso, calado de projeto, sem intervenção estrutural.



Nas Figura 47, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 47 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha para calado de projeto e sem intervenção – solo argiloso.**



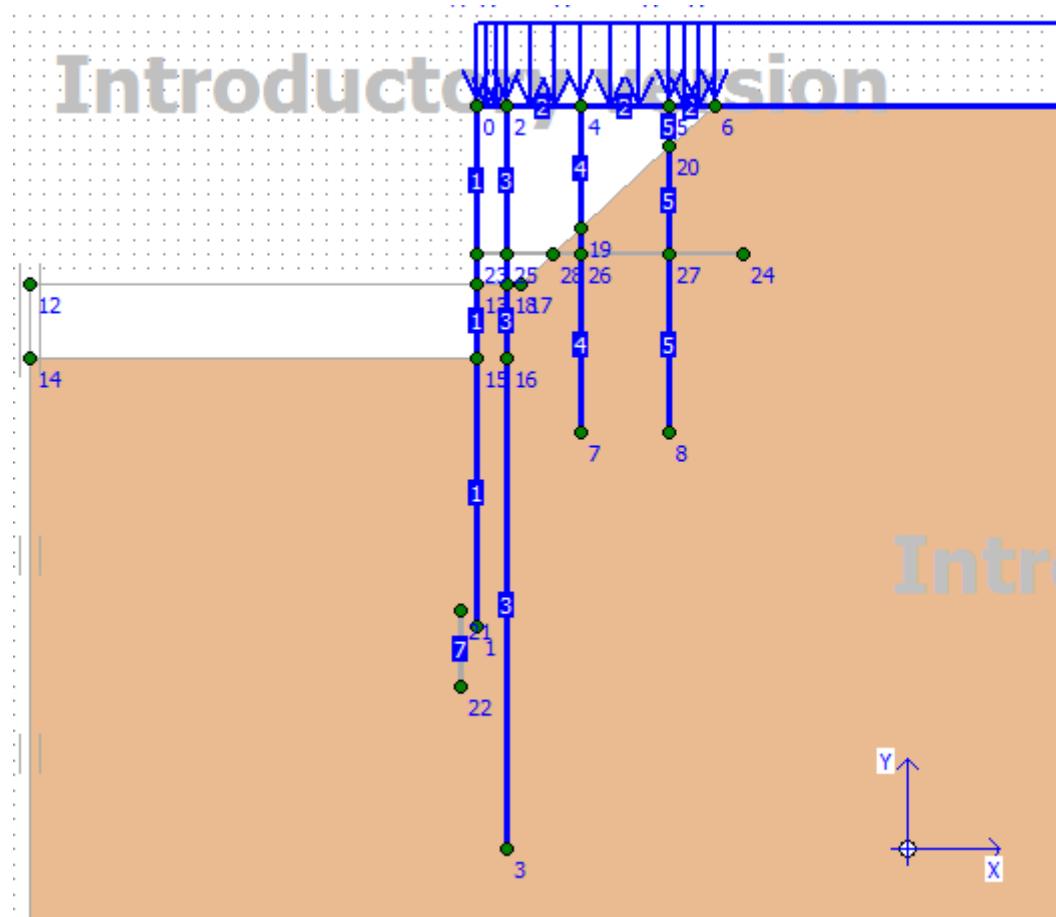
O fator de segurança para a situação de calado de projeto sem intervenção é 3,105.

Esse fator de segurança pode parecer muito alto, porém ele não corresponde ao fator de segurança verdadeiro da situação real, pois é compensado por um fator de segurança muito próximo de 1 do caso da análise em solo homogêneo arenoso.

O deslocamento horizontal máximo, de 88 cm, ocorre ao pé da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é de cerca de 40 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 1060 kN.m/m, é maior que o momento último (546 kN.m/m), o que levaria à ruptura da estaca-prancha. O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 133 kN/m, é muito menor que o valor último (593 kN/m).

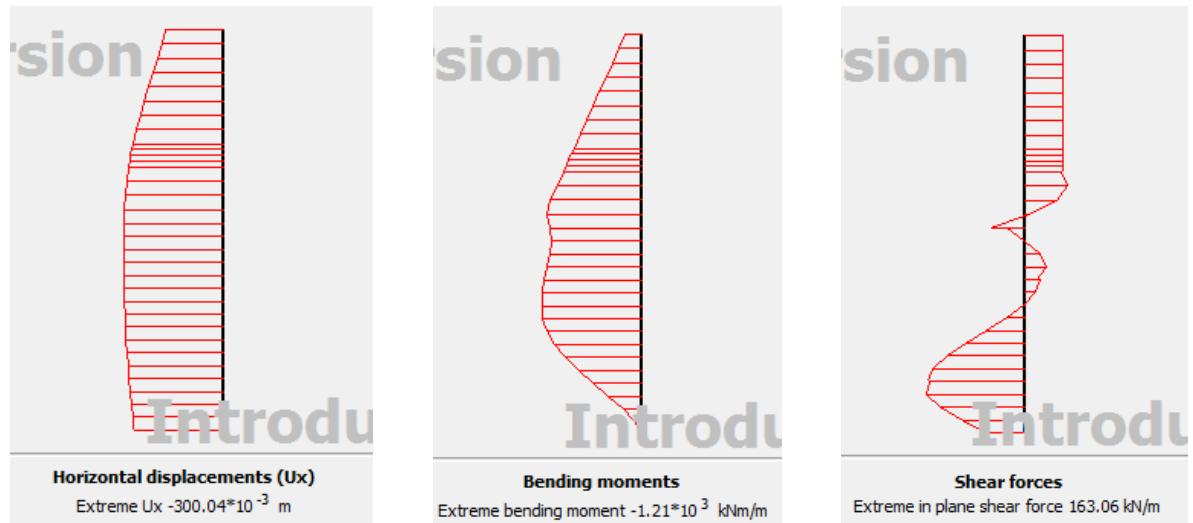
- Sem intervenção, berço com o calado futuro de 17 metros:

**Figura 48 - Modelo em solo argiloso, calado futuro, sem intervenção estrutural.**



Nas Figura 49, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 49 - Deformações horizontais, momentos e esforço cortante na estaca-prancha para calado futuro e sem intervenção – solo argiloso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro sem intervenção é 2,606. Comparando-se esse fator de segurança com o obtido para a situação do calado com 12 metros (3,105), nota-se uma queda, como é de se esperar.

Esse fator de segurança pode parecer muito alto, porém ele não corresponde ao fator de segurança da situação real, pois é compensado por um fator de segurança muito próximo de 1 do caso da análise em solo homogêneo arenoso.

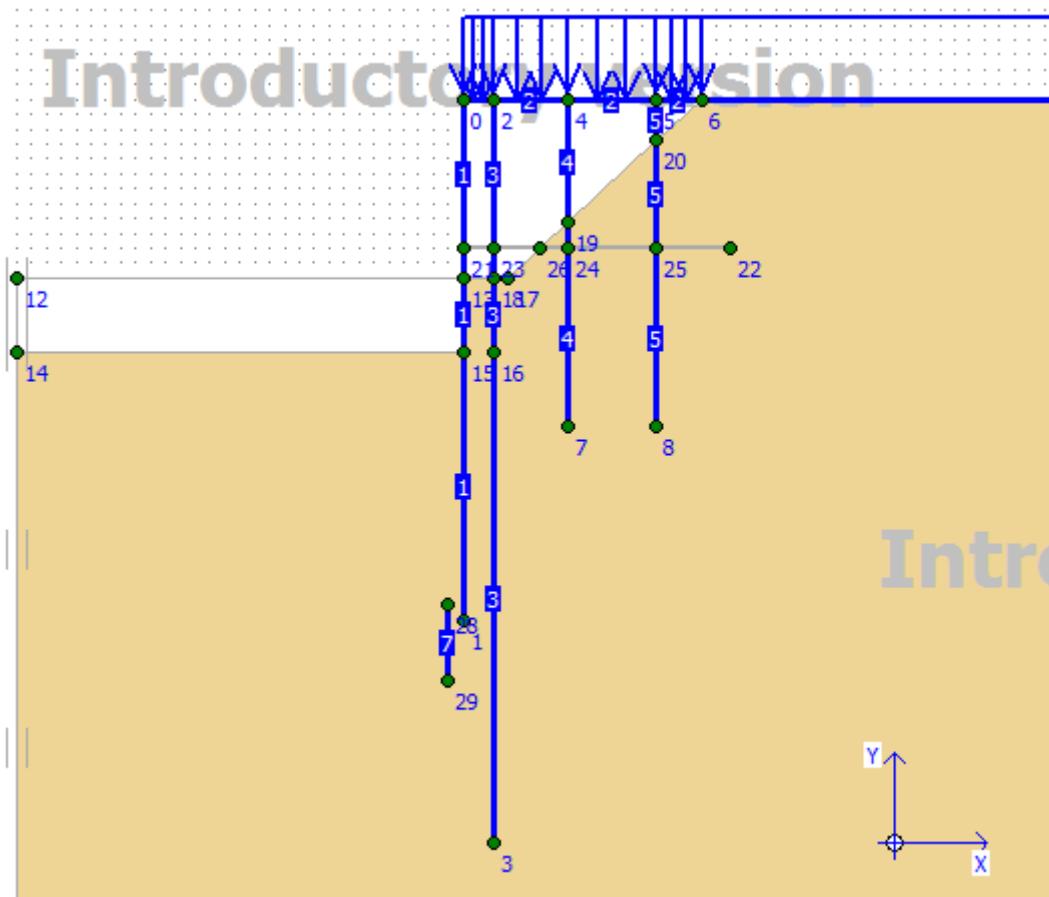
O deslocamento horizontal máximo, de 30 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é de aproximadamente 20 cm. Nota-se que o diagrama de deslocamentos horizontais do caso de solo argiloso é muito próximo ao do caso de solo arenoso. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 1210 kN.m/m, é maior que momento último (546 kN.m/m), o que levaria à ruptura da estaca-prancha. O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 163 kN/m, é menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 12 metros sem intervenção estrutural, é interessante notar que o momento fletor e a força cortante máximos na estaca-prancha aumentam como era de se esperar. Entretanto, o deslocamento horizontal máximo neste caso de 17 metros de calado sem intervenção é menor do que aquele obtido para 12 metros (30 centímetros contra 88 centímetros). Porém, a posição na estaca-prancha desses deslocamentos máximos é diferente.

### 9.5.2 Somente intervenção vertical: colunas de *jet-grouting* armado

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com a profundidade de 17 metros na situação em que a intervenção estrutural no cais é somente a realização de colunas de *jet-grouting* armado, de cinco metros de comprimento, junto à ponta da estaca-prancha.

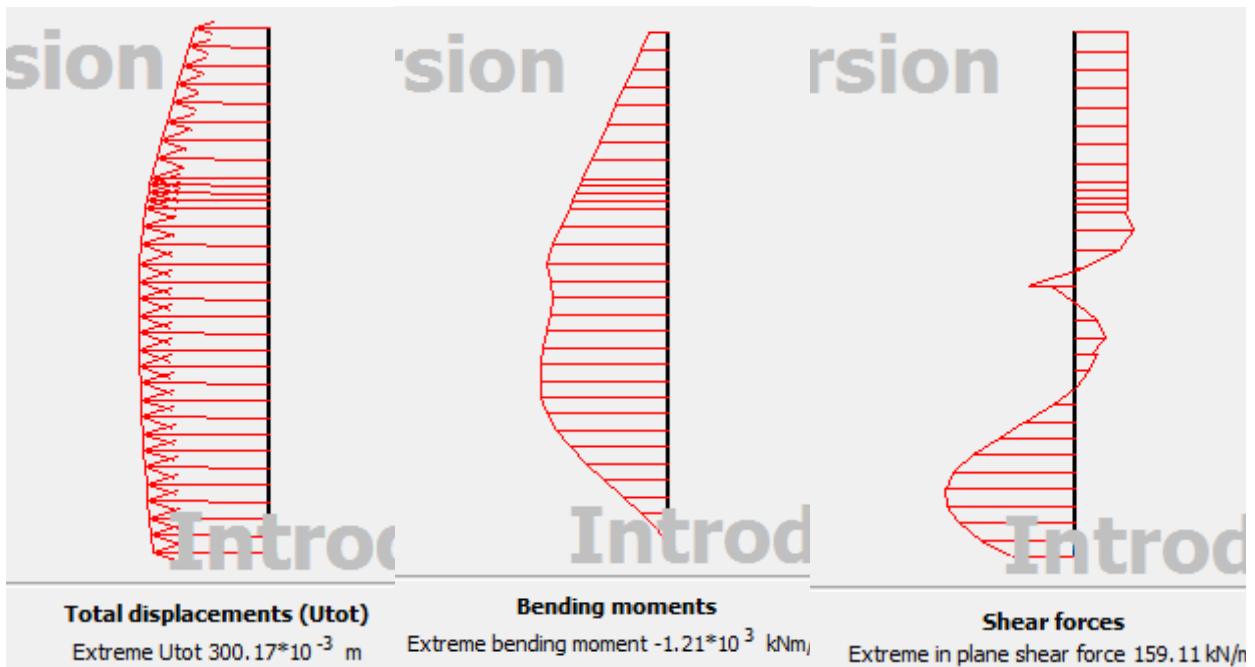
No modelo que simula a situação com a intervenção estrutural somente com colunas de *jet-grouting* armado, foram adotadas seis placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e uma placa vertical que simula as colunas de *jet-grouting* armado, como pode ser visto na Figura 64. Por limitação da versão introdutória do Plaxis®, utilizada neste trabalho, todas as placas possuem as mesmas características mecânicas já calculadas. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto.

**Figura 50 – Modelo em solo argiloso com intervenção vertical.**



Nas Figura 51, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 51 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção vertical – solo argiloso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção vertical é 2,604.

Nota-se que esse fator de segurança é praticamente o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (2,606), o que evidencia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que o aumento da ficha da estaca-prancha em cinco metros não altere em quase nada o equilíbrio geotécnico. O fato de as estacas de alívio, situadas a 1,20 metros de distância da estaca-prancha, atingirem cota muito mais profunda reforça essa hipótese, visto que as colunas de *jet-grouting* são realizadas ao pé da estaca-prancha.

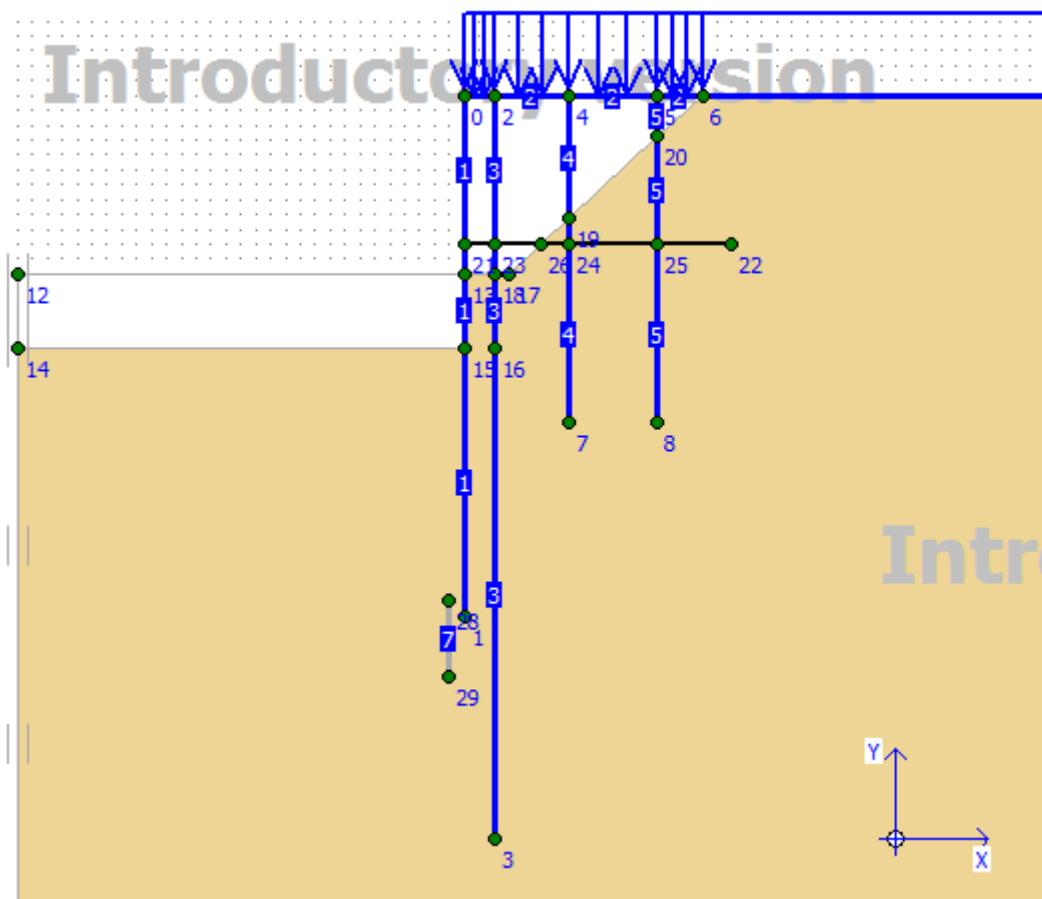
O deslocamento horizontal máximo, de 30 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha e o deslocamento horizontal no topo é aproximadamente 20 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 1210 kN.m/m, é maior que o momento último (546 kN.m/m), o que levaria à ruptura. O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 160 kN/m, é menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostra que as colunas de *jet-grouting* armado de cinco metros de comprimento aos pés da estaca-prancha têm pouca eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo, o Porto de Navegantes. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso são os comprimentos das estacas-prancha e de alívio.

### 9.5.3 Somente intervenção horizontal: tirante miniJet®

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com o calado futuro na situação em que a intervenção estrutural no cais é somente a realização de tirantes miniJET®, de 18 metros de comprimento (como no caso do Porto de Ravena), a uma cota de -10 metros. Foi adotada uma distância entre tirantes de 3 metros.

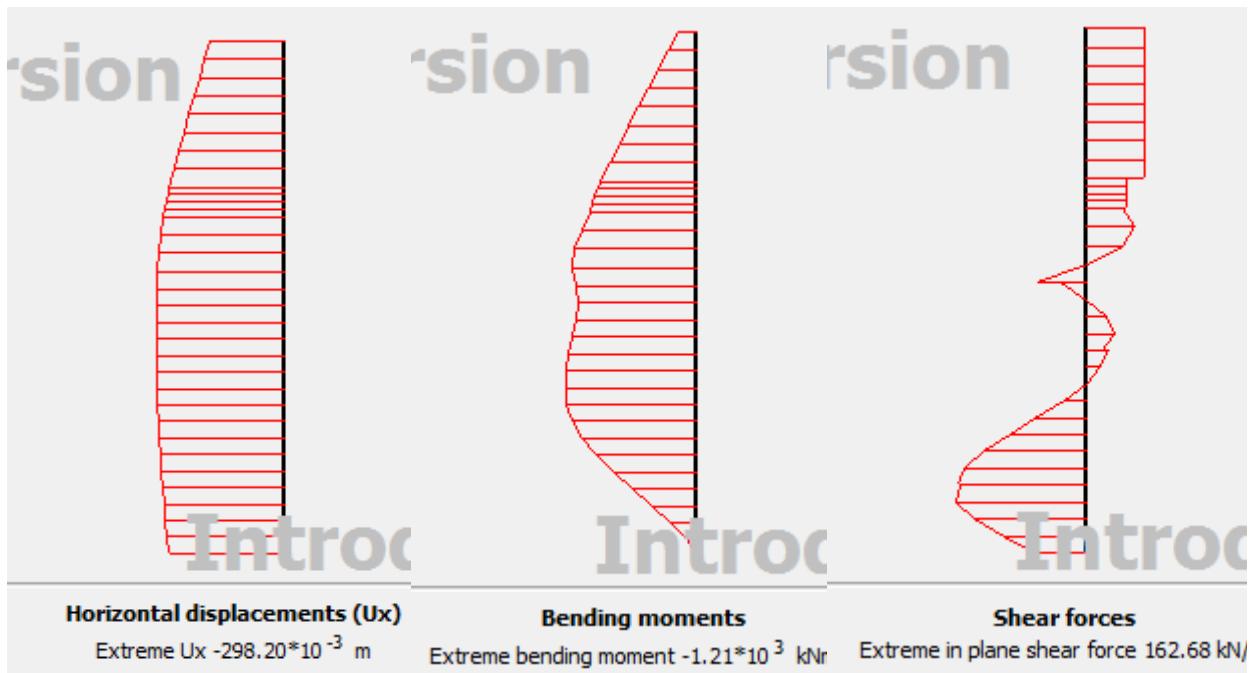
Assim, foram modeladas cinco placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e, claro, um tirante que simula o miniJET®, como pode ser visto na Figura 68. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto.

**Figura 52 - Modelo em solo argiloso com intervenção horizontal.**



Nas Figura 54, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 53 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção horizontal – solo argiloso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção horizontal é 2,606.

Nota-se que esse fator de segurança é o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (2,606), o que denuncia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que o atritamento da estaca-prancha não altere em quase nada o equilíbrio geotécnico.

Esse fator de segurança pode parecer muito alto, porém ele não corresponde ao fator de segurança da situação real, pois é compensado por um fator de segurança muito próximo de 1 do caso da análise em solo homogêneo arenoso.

O deslocamento horizontal máximo, de 30 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha, e o deslocamento horizontal no topo é aproximadamente 20 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 1210 kN.m/m, é maior que o momento último (546 kN.m/m), o que levaria à ruptura. O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 162 kN/m, é menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostram que os tirantes miniJET® de 18 metros de comprimento, a uma cota de -10 metros, espaçados 3 metros entre si, têm pouca eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso são os comprimentos das estacas-prancha e de alívio.

É interessante notar, também, a proximidade de valores e forma dos diagramas de deslocamento horizontal e de esforços solicitantes entre as situações com

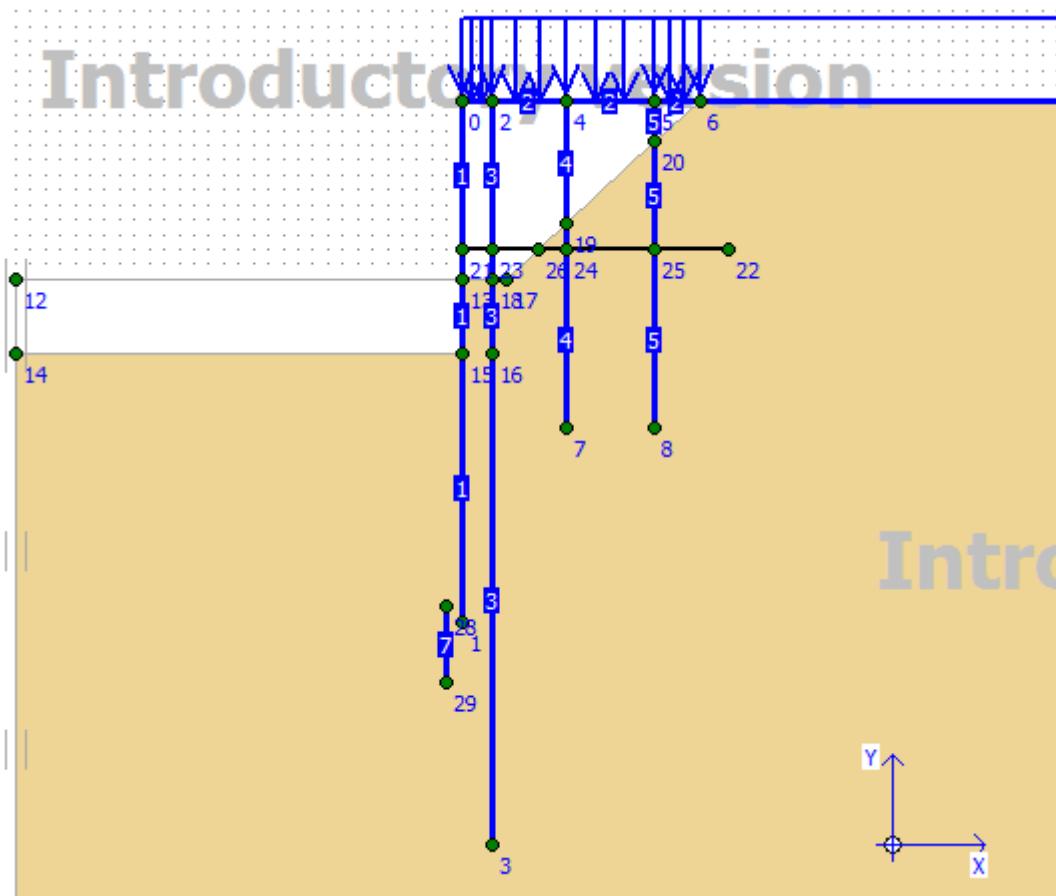
somente colunas de *jet-grouting* e somente tirantes miniJET®, outro fato que reforça a hipótese de ineficiência da intervenção para o cais em questão.

#### 9.5.4 Intervenção mista: colunas de *jet-grouting* e tirantes miniJET®

Nessa seção são mostrados os resultados do modelo do cais portuário do Porto de Navegantes com a profundidade de 17 metros na situação em que a intervenção estrutural no cais é feita tanto com a realização de colunas de *jet-grouting* armado de 5 metros de comprimento ao pé da estaca-prancha, como por tirantes miniJET®, de 18 metros de comprimento (como no caso do Porto de Ravena), a uma cota de -10 metros. Foi adotada uma distância entre tirantes de três metros.

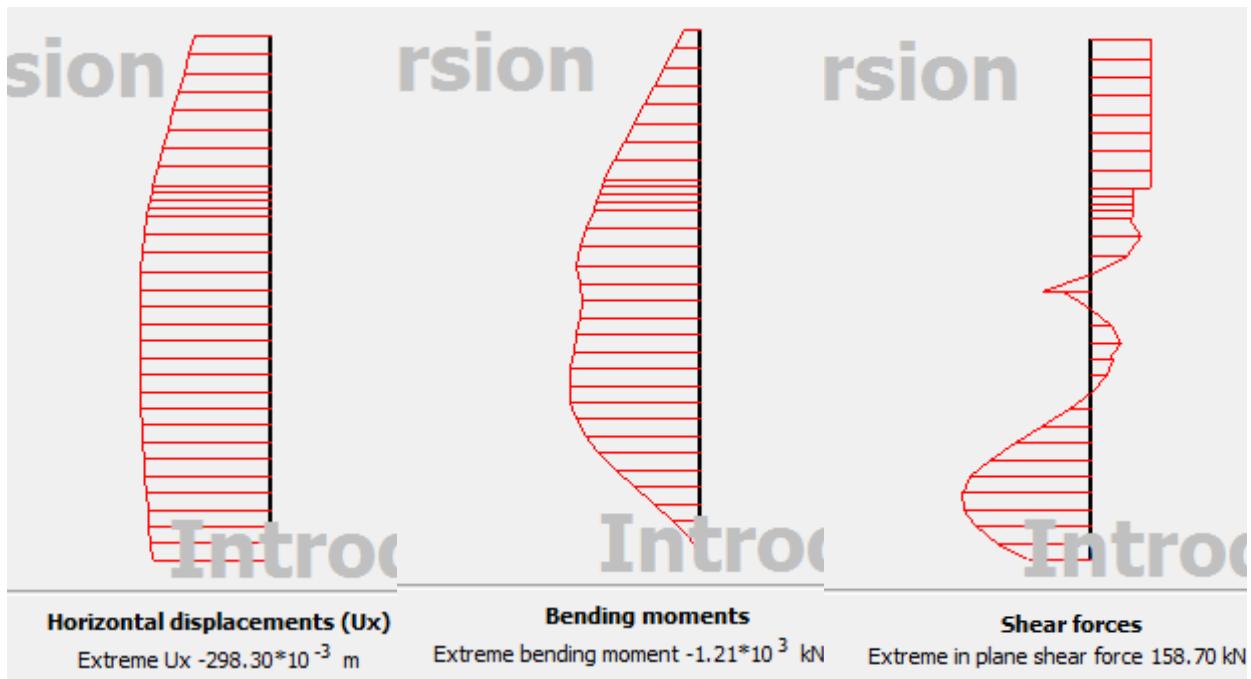
Assim, foram modeladas seis placas verticais, que simulam as estacas e os tubulões, uma placa horizontal que simula a plataforma do cais, e uma placa que simula a linha de colunas de *jet-grouting* armado. Foi também colocado no modelo um tirante que simula o miniJET®. Além disso, no modelo consta o carregamento de  $50 \text{ kN/m}^2$ , que representa a carga na plataforma e retroporto, conforme está ilustrado na Figura 55.

**Figura 54 - Modelo em solo argiloso com intervenção mista.**



Nas Figura 56, têm-se os diagramas de deformação horizontal e de esforços solicitantes na estaca-prancha.

**Figura 55 - Deformações horizontais, momento e esforço cortante na estaca-prancha – intervenção mista – solo argiloso.**



O fator de segurança para a situação de calado futuro com intervenção estrutural mista é 2,604.

Nota-se que esse fator de segurança é praticamente o mesmo obtido para a profundidade de 17 metros sem intervenção (2,606), o que evidencia a não eficácia dessa intervenção estrutural para o cais. Uma possível justificativa para isso pode ser o grande comprimento das estacas-prancha e da estaca de alívio, que atingem as cotas de -32,6 metros e -48,9 metros, respectivamente, fazendo com que nem o aumento da ficha da estaca-prancha em 5 metros nem o atirantamento tenha muito efeito no equilíbrio geotécnico. O fato de as estacas de alívio, situadas a 1,20 metros de distância da estaca-prancha, atingirem cota muito mais profunda reforça essa hipótese, visto que as colunas de *jet-grouting* são realizadas ao pé da estaca-prancha.

O deslocamento horizontal máximo, de 30 cm, ocorre a meia altura da estaca-prancha, e o deslocamento horizontal no topo é aproximadamente 20 cm. O diagrama de momento fletor mostra que o valor máximo, 1210 kN.m/m, é maior que o momento último (546 kN.m/m), o que levaria à ruptura. O diagrama de força cortante mostra que seu valor máximo, 159 kN/m, é menor que o valor último (593 kN/m). Comparando esses valores com aqueles obtidos para o calado de 17 metros sem intervenção estrutural, percebe-se que são praticamente idênticos. Esse fato, juntamente com a quase igualdade dos fatores de segurança entre as duas situações, mostra que tanto as colunas de *jet-grouting* armado como os tirantes miniJET® têm pouca eficácia para o arranjo estrutural do cais em estudo. Como já dito acima, uma possível justificativa para isso são os comprimentos das estacas-prancha e de alívio.

É interessante notar, também, a proximidade de valores e de forma dos diagramas de deslocamento horizontal e de esforços solicitantes entre as situações

com somente colunas de *jet-grouting* e somente tirantes miniJET®, outro fato que reforça a hipótese de ineficiência da intervenção para o cais em questão.

## 9.6 Medidas corretivas

Como a análise tensão-deformação foi inconclusiva quanto à eficácia da técnica de *jet-grouting* armado para aumento de calado de cais portuário, serão descritas brevemente algumas outras possíveis soluções:

- Cortina de estaca-prancha na retroárea: solução mais difícil. Consiste na cravação de cortina de estacas macho-fêmea para resistir ao empuxo.
- Laje estaqueada: melhor solução e mais segura, porém é cara. Ao cravar verticalmente, tem-se maior controle da cravação e é possível dimensionar a laje com a sobrecarga adequada. Para atravessar o muro de arrimo de enrocamento presente na seção transversal, seria necessária a execução de rotopercussão com martelo de fundo. Uma forma de reduzir os custos seria adotar estacas com diâmetro maior, pois assim a capacidade de carga seria maior e o espaçamento seria menor.

## 10 CONCLUSÃO

Atualmente há um progressivo aumento do tamanho dos navios de carga. Entretanto, os principais portos do mundo e do Brasil continuarão sendo os mesmos: surge, assim, a necessidade de adaptar os cais e berços de atracação dos portos atuais para que recebam esses navios. Das diversas adaptações necessárias a um porto para receber embarcações maiores, o aprofundamento do berço de atracação é uma das mais críticas. Existem diversas técnicas de engenharia de estruturas que enfrentam esse problema. Uma delas é o uso de jet-grouting armado, desenvolvida há poucas décadas e ainda pouco difundida no Brasil. Este trabalho se propõe a estudar a técnica do jet-grouting armado para aumento de calado de cais portuário, discutir seu desenvolvimento histórico, aspectos físicos e propor sua aplicação em um modelo inspirado em porto real brasileiro.

A técnica de jet-grouting vem se desenvolvendo muito rapidamente nos últimos anos, e novas tecnologias surgiram de forma a ampliar sua possibilidade de uso: após a CCP (tecnologia monofluido), surgiram a JSG (bi-fluido) e a CJG (tri-fluido). Para que as colunas de jet-grouting resistam a esforços de flexão, passou-se a armá-las, inicialmente com a inserção de perfis metálicos em seu centro, hoje em dia com a prática do uso de tubos de injeção de sacrifício, que são deixados dentro da coluna de jet-grouting para funcionar como armadura. Posteriormente, surgiu a técnica da realização de tirantes sub-horizontais com jet-grouting armado e, após, surgiu tecnologia de adaptação dessa tecnologia de atirantamento para o uso subaquático.

O jet-grouting armado não é sempre a melhor alternativa de intervenção estrutural para aumento de calado em portos, e nem deve ser usado indiscriminadamente. Há aspectos físicos a serem considerados para analisar sua conveniência de uso. Aspectos como estabilidade local e global, mudança nos esforços da conexão prancha-tabuleiro, possibilidade de fluidificação do solo argiloso submetido a injeção de grout, não exequibilidade de tirantes por razões de espaço e geomecânicas, possível levantamento de fundo de canal, mudança no andamento dos esforços no solo e conexão inadequada entre prancha e coluna de jet-grout devem ser levados em consideração por parte do projetista na hora da escolha de como intervir na estrutura do cais portuário. Além disso, o projetista deve considerar também outros problemas associados ao aumento do tamanho do navio-tipo, como aumento das forças de atracação/amarração e aumento de sobrecarga na retroárea.

Do ponto de vista ambiental, verifica-se de maneira mais generalista (já que a análise em si é muito dependente do local em que será executada a técnica) que a técnica pode causar diversos impactos negativos, principalmente se os elementos de sua execução e os parâmetros geotécnicos não forem bem controlados, podendo até se tornarem superiores aos ganhos positivos referentes ao emprego da técnica do *jet-grouting* obra como o ganho na velocidade de execução que torna o impacto positivo referente ao crescimento do porto e da localidade associada pode ficar comprometido.

Tomando como orientação de uso da técnica de jet-grouting armado para o aumento do calado em cais portuário dois casos de sucesso, a realização de colunas de jet-grouting no Porto de Navegantes e a realização de tirantes miniJet no Porto de Ravenna, foi feito um estudo em Elementos Finitos, através do software Plaxis Introductory, do seu uso em um modelo de cais portuário inspirado no Porto

de Navegantes, em Santa Catarina. No estudo, foi analisado três diferentes intervenções: somente colunas de jet-grouting armado, somente tirantes miniJet e intervenção com tanto colunas de jer-grouting armado e tirantes miniJet. As dimensões e método executivo proposto para as intervenções são os mesmos dos estudos de caso.

Através da comparação dos fatores de segurança e diagrama de esforços das diferentes configurações estruturais constatou-se que a intervenção não surtiu efeito no modelo. Entretanto, essa constatação não corresponde a realidade, pois pôde-se observar que as simplificações do modelo e as limitações da versão gratuita do Plaxis fizeram com que o modelo ficasse muito distante da realidade. Esse distanciamento pode ser constatado, por exemplo, no fato de que as estacas e tubulões, que são elementos discretos, serem modelados como elementos contínuos.

Por outro lado, há uma consideração a ser feita a respeito da especificidade do Porto de Navegantes que podem torná-lo menos apto às intervenções propostas: o comprimento exagerado das estacas prancha e de alívio, que atingem as profundidades de -32,60 metros e -48,90 metros, respectivamente. A grande profundidade que atinge esses elementos de fundação fazem com que intervenção de tirantes a uma profundidade de – 8 metros e uma cortina de colunas jet-grouting de 6 metros de comprimento ao pé da estaca-prancha tenha pouco efeito. Levando-se em consideração a incapacidade do modelo no Plaxis Introductory em modelar esses elementos de forma geometricamente discreta, como são na realidade, faz com que a eficácia dessas intervenções no modelo computacional tenda a ser ainda menor.

Enfim, consegue-se que a técnica de jet-grouting armado para aumento de calado de cais portuário oferece às engenharias estrutural, geotécnica e portuária uma alternativa prática muito interessante no que se refere à versatilidade de aplicação (uso submerso e utilização de menos equipamentos) e alta produtividade. Por essas razões, suas variações de aplicação e tecnologia merecem continuar a serem estudadas, de forma a aproximar cada vez mais essa tecnologia da prática e necessidades da engenharia do dia-a-dia. Um enfoque deve ser dado ao desenvolvimento de modelos verdadeiramente representativos dessa tecnologia nas mais diversas condições de solo e uso, sejam modelos analíticos ou em Elementos Finitos, como o deste trabalho. O desenvolvimento de modelos que representem de forma mais fiel os aspectos físicos relacionados ao aprofundamento de calado com o uso de jet-grouting armado é um próximo passo importante para a efetiva disseminação da técnica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTOLANI, A. D.; LEME, F. L. **Carregamento de contêineres em navios.** Outubro, 2004.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos Solos.** Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

**Canal de Panamá: Frequently Asked Questions.** Disponível em: <<http://micanaldepanama.com/expansion/faq/#prettyPhoto>> Acesso em: 20 junho 2016.

**Canal do Panamá/** Eduardo de Freitas – Mundo Educação. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/canal-panama.htm>> Acesso em: 20 junho 2016.

**Canal do Panamá: efeito da expansão nos portos do Brasil/** Fernando Antônio Corrêia Serra, José Gonçalves Moreira Neto, Michel Bittencourt Weber. – Brasília: Editora ANTAQ, 2012.

CARLETTO, M.F.W. **Jet-grouting (Sistema monofluído): um método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas.** 2009. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Conheça as técnicas de execução de *jet-grouting*. **Téchne** – Edição 200 – Novembro/ 2013. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/200/artigo301307-2.aspx>> Acesso em: 20 junho 2016.

COSTA FORTUNA | ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Jet-grouting.** Disponível em: <<http://www.costafortuna.com.br/downs/apJetGrouting.pdf>> Acesso em: 20 junho 2016.

COSTA FORTUNA | ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Mini-JET/UWA.** Disponível em: <<http://www.costafortuna.com.br/downs/apMiniJet.pdf>> Acesso em: 20 junho 2016.

COSTA FORTUNA | ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Portfólio – Principais obras no Brasil.** Disponível em: <<http://www.costafortuna.com.br/portfolio.html>> Acesso em: 20 junho 2016.

Danutė Sližytė, Algirdas Dagys, Jurgis Medzvieckas, Romualdas Milvydas. **Using of jet-grouting piles reinforced with central bars for low retaining walls.** Lituânia: Vilnius Gediminas Technical University, 2010.

FARIA, Caroline. **Canal do Panamá** – InfoEscola. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/hidrografia/canal-do-panama/>> Acesso em: 20 junho 2016.

GEOSONDA S.A. **Jet-grouting.doc.** Disponível em: <[www.geosonda.com.br/jetgrouting.doc](http://www.geosonda.com.br/jetgrouting.doc)> Acesso em: 20 junho 2016.

HISTORY CHANNEL. **História do Canal do Panamá.** Disponível em: <<http://seuhistory.com/infograficos/historia-do-canal-do-panama>> Acesso em: 20 junho 2016.

MAFFEI, C. E. M.; GONÇALVES, H. H. S. **Utilização da técnica de jet-grouting para aumento do calado de cais.**

NÚÑEZ, Eustorgio Jaén. **Valoração econômica do serviço de redução de sedimentos das florestas da bacia hidrográfica do Canal do Panamá.** Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 2011.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** Editora Oficina de Textos.

SANTOS, F. C. **Canais de Acesso aos Portos Brasileiros: Demandas de Infraestrutura pela Evolução dos Navios Tipo.** 2013. 44 páginas. Curso de Especialização em Engenharia e Gestão Portuária. Florianópolis.

SCIACCA, L.; VALMORI, F.; MELEGARI, C.; MALETTI, F.; LENZI, M.; CAMPANA, P.; PADOVANI, V. **Indagine Teorico-Sperimentale su Tiranti Subacquei Realizzati con Tecnologia Under Water Anchors.** Bolonha, Itália: Ingegneri Architetti Costruttori, 2010.

SCIARRETTA, Toni. Panamá – Canal do Panamá. **Folha de São Paulo.** Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/turismo/americacentral/panama-canal.shtml>> Acesso em: 20 junho 2016.

TECNOGEO. **Colunas** ***jet-grouting.*** Disponível em:  
<[http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia\\_jg.pdf](http://www.tecnogeo.com.br/sites/default/files/infotec/metodologia_jg.pdf)> Acesso  
em: 20 junho 2016.

**UNDER WATER ANCHORS S.R.L. Realizzazione di Ancoraggi Subacquei Sub-Orizzontali secondo la tecnica “U.W.A.”**

VICENZI, Angela. **Cmc di Ravenna – Sapir – S. Ope. Mar. Nasce UWA.** La Betoniera 03, 2012.