



Metropolitano de Lisboa

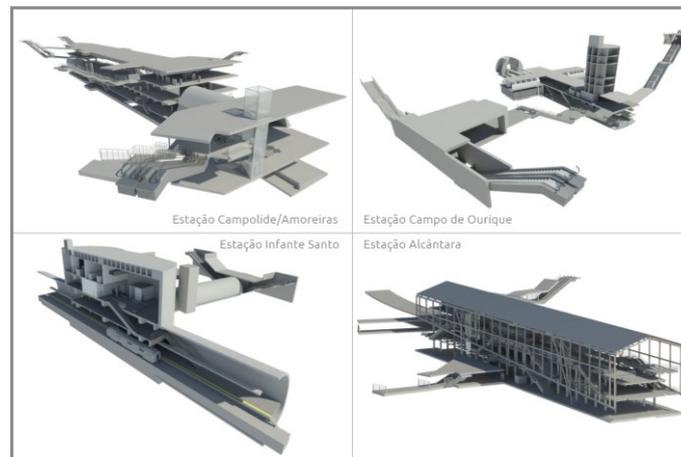


METRO DE LISBOA

LINHA VERMELHA ENTRE SÃO SEBASTIÃO E ALCÂNTARA

EMPREITADA DE CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PROLONGAMENTO DA LINHA

PROJETO DE EXECUÇÃO



TOMO III: OBRAS ESPECIAIS

VOLUME 5 - OE5: TÚNEL ZONA DO BALUARTE

NOTA DE CÁLCULO – ESTRUTURAS PROVISÓRIAS

Documento SAP:	LVSSA MSA PE STR TUN OE5 NC 088001 0
-----------------------	--------------------------------------

	Nome	Assinatura	Data
Elaborado	Pedro Marques/ Carlos Martins		2024-10-04
Revisto	Rui Tomásio		2024-10-04
Verificado	Sandra Ferreira/ Gonçalo Mateus		2024-10-04
Coordenador Projeto	Rui Rodrigues		2024-10-04
Aprovado	Raúl Pistone		2024-10-04



Metropolitano de Lisboa



Índice

1	OBJETIVO E ÂMBITO.....	6
2	SISTEMAS DE UNIDADES	7
3	REGULAMENTAÇÃO/NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA TÉCNICA.....	8
4	MODELOS DE CÁLCULO.....	10
5	CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	11
5.1	Descrição geral	11
5.2	Estado limite último	12
5.3	Estado limite de serviço	15
6	RESUMO DAS VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA	16
6.1	Estado Limite Último (ELU)	16
6.2	Verificação da Segurança ao Estado Limite de Utilização da Contenção Periférica (ELS)	18

Índice de Figuras

Figura 1 - Modelo de elementos finitos elaborado no Plaxis 2D	11
Figura 2 – Deslocamento máximo horizontal da cortina de estacas (24mm)	19

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Combinações de ações consideradas nas verificações de segurança	11
Tabela 2 – Verificações de segurança associadas às contenções provisórias	12
Tabela 3 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à flexão	16
Tabela 4 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência ao corte	16
Tabela 5 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência da seção das microestacas	17
Tabela 6 – Verificação de segurança ao estado limite último de capacidade de carga do terreno	17
Tabela 7 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento das escoras HEB 300	17
Tabela 8 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento das escoras em pé de galinha 2xHEB 300	17

1 OBJETIVO E ÂMBITO

O presente documento diz respeito ao desenvolvimento, ao nível de **Projeto de Execução**, da **Nota de Cálculo das estruturas provisórias da Obra Especial 5 – Túnel na Zona do Baluarte**, no âmbito do Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, que é parte integrante do **Tomo III – Obras Especiais do Volume 5 – OE5: Túnel Zona do Baluarte**.

2 SISTEMAS DE UNIDADES

O sistema de unidades utilizado na elaboração do Projeto é o Sistema Internacional de Unidades (SI). As principais unidades utilizadas são as seguintes:

- Comprimento: metro (m).
- Força: quilonewton (kN).
- Momento: quilonewton metro (kN.m).
- Tensão no terreno: quilonewton por metro quadrado (kN/m^2) ou quilopascals (kPa).
- Tensão nos elementos estruturais: newton por milímetro quadrado (N/mm^2) ou megapascals (MPa).
- Peso específico: quilonewton por metro cúbico (kN/m^3).

3 REGULAMENTAÇÃO/NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA TÉCNICA

O Projeto será desenvolvido de acordo com a regulamentação nacional em vigor, ou europeia em caso de omissão, destacando-se as seguintes normas:

- NP EN 1990 – Bases para projetos de estruturas (EC0);
- NP EN 1991 – Bases de projeto e ações em estruturas (EC1);
- NP EN 1992 – Projeto de Estruturas de Betão (EC2);
- NP EN 1993 – Projeto de Estruturas de Aço (EC3);
- NP EN 1994 – Projeto de Estruturas mistas Aço-Betão (EC4);
- NP EN 1997 – Projeto Geotécnico (EC7);
- NP EN 1998 – Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos (EC8);
- fib Model Code 2010 for Concrete Structures;
- Normas de Projeto de estruturas do Metropolitano de Lisboa.

Serão ainda consideradas as seguintes normas de execução:

- NP EN 206 – Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade;
- NP EN 13670-1 - Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras Gerais;
- NP EN 14199 – Execução de obras geotécnicas especiais: Microestacas;
- NP EN 1537 - Execução de obras geotécnicas especiais: Ancoragens;
- EN ISO 22447-5 – Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 5: Testing of grouted anchors;
- EN 1536 - Execution of Special Geotechnical Works: Bored piles;
- EN 14490 - Execution of Special Geotechnical Works: Soil nailing;
- NP EN 197-1 - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes;
- NP EN 197-2 - Cimento. Parte 2: Avaliação de conformidade;
- NP EN 13251 - Geotêxteis e produtos relacionados. Características requeridas para a utilização em obras de terraplenagem, fundações e estruturas de suporte;
- NP EN 14487-1 - Betão projetado. Parte 1: Definições, especificações e conformidade;
- NP EN 14487-2 - Betão projetado. Parte 2: Execução;
- NP EN 14889-1 - Fibras para betão - Parte 1: Fibras de aço - Definições, especificações e conformidade;

-
- NP EN 14488-5 -Ensaio do betão projetado - Parte 5: Determinação da capacidade de absorção de energia de provetes de lajes reforçadas com fibras;
 - NP EN 445 - Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio;
 - NP EN 446 - Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Procedimentos para injeção;
 - NP EN 447 - Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Especificações para caldas correntes.

4 MODELOS DE CÁLCULO

No dimensionamento estrutural e geotécnico das contenções provisórias foram consideradas as situações de projeto transitórias, correspondentes a condições temporárias e outras condições relacionadas com o faseamento construtivo da obra.

A análise estrutural foi realizada com base em modelos planos para o dimensionamento das secções representativas das estruturas de contenção.

Os modelos adotados foram realizados com recurso ao programa de elementos finitos *Plaxis 2D* da *Bentley*, o qual permite modelar a interação entre o solo e as estruturas por meio de uma análise de tensões e deformações.

Os modelos de cálculo permitiram a modelação de todas as fases construtivas, metodologia essencial na análise deste tipo de estruturas, tendo sido obtidos como resultados, para além de deformações do maciço envolvente, os esforços nas estruturas de contenção em particular nas cortinas de estacas, assim como nas escoras e microestacas metálicas de travamento.

Com base nos esforços obtidos, realizaram-se as verificações de segurança dos elementos estruturais em relação aos estados limites últimos de rotura e aos estados limites de utilização. Os esforços resistentes foram, em geral, determinados a partir de folhas de cálculo ou, em alternativa, a partir de programas de cálculo automático.

Para definição da malha de elementos finitos, foram utilizados elementos triangulares de 15 nós tendo o nível de discretização da malha sido localmente ajustado para uma maior densidade de elementos finitos junto às estruturas de contenção.

O faseamento construtivo foi simulado de acordo com o previsto no projeto, tendo-se iniciado pela primeira fase de geração de tensões iniciais e em seguida execução das estruturas de contenção, nomeadamente cortinas de estacas, e aplicadas as sobrecargas à superfície sendo nesse momento efetuada uma zeragem das deformações antes de prosseguir para os seguintes passos. As fases seguintes foram simuladas conforme faseamento estabelecido nas peças desenhadas de projeto, incluindo a fase de execução da estrutura definitiva e execução do aterro sobre este de forma faseada com a desinstalação dos escoramentos metálicos.

Apresenta-se na Figura 1 o modelo elaborado para estudo da contenção provisória.

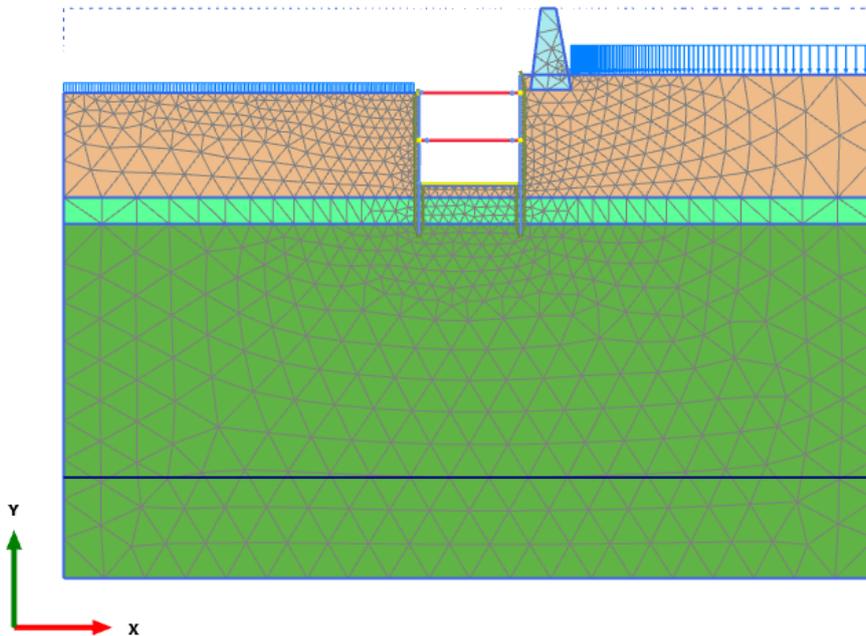


Figura 1 - Modelo de elementos finitos elaborado no Plaxis 2D

5 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

5.1 Descrição geral

A verificação da segurança dos diversos elementos estruturais que constituem as soluções propostas foi efetuada de acordo com as disposições regulamentares, nacionais e internacionais, em vigor.

As referidas disposições regulamentares traduzem-se na aferição das dimensões médias dos elementos estruturais para um conjunto de situações de projeto a que corresponde uma expectável probabilidade de ocorrência dos estados limite.

Neste contexto, estes estados constituem limites para além dos quais a estrutura deixa de satisfazer os requisitos fundamentais de projeto, nomeadamente estados limites últimos e estados limites de utilização.

Com vista à verificação de segurança dos diversos elementos, as ações foram agrupadas nas seguintes combinações de ações:

Tabela 1 – Combinações de ações consideradas nas verificações de segurança

Verificações de segurança	Combinação
Estados Limites Últimos (ELU)	Combinações fundamentais de ações
Estado Limite de Utilização (ELS)	Combinação característica de ações

Para a verificação da segurança aos estados limites referidos foram considerados valores dos coeficientes parciais de segurança relativos às ações e aos materiais, segundo os regulamentos correspondentes a cada um destes.

Nesta fase de estudo consideraram-se relevantes as verificações da segurança aos estados limites dos elementos estruturais indicados na Tabela 2, sendo as mesmas efetuadas de acordo com as disposições das normas NP EN 1992-1, NP EN 1993-1 e NP EN 1997-1.

Tabela 2 – Verificações de segurança associadas às contenções provisórias

	Tipo de verificação	
Verificação da Segurança aos Estados Limites Últimos (ELU)	Cortina de estacas	Estado limite último de resistência à flexão
		Estado limite último de resistência ao corte
	Microestacas	Estado limite de resistência da seção
		Estado limite último de capacidade de carga do terreno (atrito lateral)
		Estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento
	Escoras	Estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento
	Vigas de coroamento, distribuição e recalçamento, em betão armado	Estado limite último de resistência à flexão
		Estado limite último de resistência ao corte
	Vigas de distribuição metálicas	Estado limite último de resistência à flexão
		Estado limite último de resistência ao corte
Betão projetado	Estado limite último de resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	
	Estado limite último de resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	
Verificação da Segurança ao Estado Limite de Utilização (ELS)	Cortina de estacas	Deformação horizontal
	Terreno envolvente	Assentamentos das estruturas localizadas na zona de influência da escavação

5.2 Estado limite último

5.2.1 Resistência à flexão de elementos

De acordo com o Eurocódigo 2, a verificação ao Estado Limite Último de resistência à flexão foi assegurada através da seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

onde:

M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;

M_{Rd} valor de cálculo da resistência máxima do elemento estrutural.

5.2.2 Resistência ao corte de elementos

De acordo com o Eurocódigo 2, no âmbito da verificação do Estado Limite Último de resistência ao esforço transversal, deverá satisfazer-se a seguinte condição:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,S}$$

Em que:

V_{Ed} - valor de cálculo do esforço transversal atuante;

$V_{Rd,S}$ - valor de cálculo do esforço transversal que pode ser suportado por um elemento com armadura específica de esforço transversal;

A armadura de esforço transversal é calculada de forma a satisfazer $V_{Ed} \leq V_{Rd,S}$. De entre os métodos de cálculo disponíveis optou-se por se seguir o disposto no método das bielas de inclinação variável, para elementos com armadura de esforço transversal constituída por estribos verticais.

$$V_{Rd,S} = \frac{A_{sw}}{s} \times z \times b \times f_{ywd} \times \cot \theta$$

onde:

θ - ângulo das bielas de betão com o eixo do elemento;

A_{sw} - área da armadura de esforço transversal;

s - espaçamento da armadura de esforço transversal;

z - para um elemento de altura constante, representa o binário das forças interiores correspondente ao momento fletor máximo no elemento que está a ser considerado. Usualmente pode recorrer-se ao valor aproximado $z=0,9d$.

f_{ywd} - valor de cálculo da tensão de cedência da armadura de esforço transversal;

Da aplicação desta expressão resultam, para verificação da condição $V_{Ed} \leq V_{Rd,S}$, as áreas de armadura transversal a adotar nos elementos de betão armado.

5.2.3 Resistência da secção das microestacas

De acordo com o Eurocódigo 2, a verificação ao Estado Limite Último de resistência ao esforço axial foi assegurada através da seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1$$

onde:

N_{Ed} - valor de cálculo do momento fletor atuante;

N_{Rd} - valor de cálculo da resistência máxima do elemento estrutural.

5.2.4 Capacidade de carga do terreno

Dado que as ancoragens se encontram à tração as características atribuídas à resistência de ponta são nulas, considerou-se, que o bolbo de selagem das ancoragens, funcionará apenas por resistência lateral. Segundo o Eurocódigo 7 a verificação da segurança é garantida pela condição:

$$\frac{N_{raro}}{R_{c;m}} \leq FS$$

onde:

N_{raro} - valor de cálculo das ações axiais correspondentes à combinação rara.

$R_{c;m}$ - valor médio da resistência do bolbo de selagem, determinado de acordo com a metodologia de Doix e Bustamante.

A resistência média do bolbo de selagem é dada pela expressão seguinte:

$$R_{c;m} = \pi \cdot \alpha \cdot D_d \cdot q_s \cdot L_{selagem}$$

em que:

α - Coeficiente de expansibilidade do furo na zona selada. Foram considerados os valores recomendados pelo fabricante, para os terrenos de selagem dos elementos;

D_d - Diâmetro de furacão;

q_s - Valor médio da resistência unitária última da interface calda-terreno, obtido a partir dos ábacos de Bustamante e Doix (1985) em função do tipo de terreno e do tipo de re-injeção;

$L_{selagem}$ - Comprimento do bolbo de selagem;

FS - Fator de segurança segundo EC7, sendo função das ações e tipo de cargas.

5.2.5 Resistência à encurvadura por varejamento das escoras

No que respeita aos perfis horizontais, do tipo HEB, de acordo com o Eurocódigo 3, a verificação da segurança ao estado limite último de resistência à encurvadura pode ser assegurado de acordo com a seguinte condição:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A_s \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

onde:

N_{Sd} - Valor de cálculo do esforço axial atuante;

$N_{b,Rd}$ - Valor de cálculo da resistência à encurvadura global.

A resistência à encurvadura global por varejamento é definida pela seguinte expressão:

sendo:

A_s - Área da secção transversal;

f_y - Tensão de cedência do aço;

γ_{M1} - Coeficiente parcial de segurança, considerado igual a 1,0;

χ - Fator de redução para o modo de encurvadura.

5.3 Estado limite de serviço

Na verificação dos estados limites de utilização no terreno ou numa seção, elemento ou ligação estruturais deve ser satisfeita a expressão:

$$E_d \leq C_d$$

em que E_d e C_d se designam respetivamente o valor de cálculo do efeito das ações e o valor limite de cálculo do critério relevante de aptidão para a utilização. A avaliação dos deslocamentos verticais e horizontais para uma estrutura de contenção é realizada considerando a combinação

6 RESUMO DAS VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

Neste capítulo apresentam-se as verificações de segurança associadas ao dimensionamento dos elementos principais constituintes das contenções provisórias. Os esforços apresentados foram obtidos ou extrapolados através dos modelos de cálculo apresentados e desenvolvidos.

6.1 Estado Limite Último (ELU)

6.1.1 Resistência à flexão de elementos de betão armado

Apresenta-se em seguida em forma de tabela a verificação ao estado limite respetivo.

Tabela 3 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à flexão

Elemento	Msd [kNm]	b [m]	d [m]	u	As,nec [cm ²]	As, adotada [cm ²]
Viga de coroamento	541,9	1,0	0,75	0,0482	17,12	21,99 (7 Ø 20)
Viga de distribuição 1º nível	218,5	0,8	0,55	0,0451	9,40	12,06 (8 Ø 16)
Viga de distribuição 2º nível	323,5	0,8	0,55	0,0668	14,12	18,85 (6 Ø 20)
Estacas //1,4m	897,8	-	0,75	-	80,13	83,47 (17 Ø 25)

Conforme apresentado na tabela, considera-se verificada a segurança no que diz respeito ao estado limite último em análise.

6.1.2 Resistência ao corte de elementos de betão armado

Apresenta-se em seguida em forma de tabela a verificação ao estado limite respetivo.

Tabela 4 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência ao corte

Elemento	Vsd [kNm]	b [m]	d [m]	z cotg [m]	As,nec [cm ²]	As, adotada [cm ²]
Viga de coroamento	1270	1,0	0,75	1,17	24,97	26,80 (Ø16// 0,15)
Viga de distribuição 1º nível	512,1	0,8	0,55	1,17	10,07	15,08 (Ø12// 0,15)
Viga de distribuição 2º nível	758,2	0,8	0,55	1,17	14,91	15,08 (Ø12// 0,15)
Estacas //1,4m	493,3	-	0,75	-	14,76	15,08 (Ø12// 0,15)

Conforme apresentado na tabela, considera-se verificada a segurança no que diz respeito ao estado limite último em análise.

6.1.3 Resistência da secção das microestacas

Apresenta-se em seguida em forma de tabela a verificação ao estado limite respetivo.

Tabela 5 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência da seção das microestacas

Elemento	Nsd [kN]	A [cm ²]	f _{yd} [MPa]	Nrd [kN]
Ø177,8x12,5mm	844	64,91	560	3635,1

Conforme apresentado na tabela, considera-se verificada a segurança no que diz respeito ao estado limite último em análise.

6.1.4 Verificação do Estado Limite Último de capacidade de carga do terreno

Apresenta-se em seguida em forma de tabela a verificação ao estado limite respetivo.

Tabela 6 – Verificação de segurança ao estado limite último de capacidade de carga do terreno

Elemento	Ned [kN]	Øfuração [mm]	T-c-s [kPa]	α	FS	L, selagem, mín [m]	L, selagem adotado [m]
Ø177,8x12,5mm	625	250	350	1,2	1,8	3,41	6,00

Conforme apresentado na tabela, considera-se verificada a segurança no que diz respeito ao estado limite último em análise.

6.1.5 Resistência à encurvadura por varejamento das escoras

Apresenta-se em seguida em forma de tabela a verificação ao estado limite respetivo.

Tabela 7 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento das escoras HEB 300

Propriedades da Secção e da Estrutura				
Secção e Material		Tipo de encurvadura	L0 [m]	c [-]
Perfil	HEB 300	Em torno do eixo y	5,0	0,90
Classe da Secção	1	Em torno do eixo z	5,0	0,68
f _y [MPa]	275	Por flexão-torção	5,0	1,00

Verificação da Segurança segundo a EN 1993-1-1				
Equações	NEd [-]	M _{y,Ed} [-]	M _{z,Ed} [-]	Verificação
EN 1993-1-1 (6.61)	0,53	0,01	0,00	0,55 ≤ 1
EN 1993-1-1 (6.62)	0,70	0,01	0,00	0,71 ≤ 1

Tabela 8 – Verificação de segurança ao estado limite último de resistência à encurvadura por varejamento das escoras em pé de galinha 2xHEB 300

Propriedades da Secção e da Estrutura			
Secção e Material	Tipo de encurvadura	L0 [m]	c [-]

Perfil	HEB 2 x 300	Em torno do eixo y	10,0	0,67
Classe da Secção	1	Em torno do eixo z	5,0	0,69
fy [MPa]	275	Por flexão-torção	5,0	1,00

Verificação da Segurança segundo a EN 1993-1-1				
Equações	NEd [-]	My,Ed [-]	Mz,Ed [-]	Verificação
EN 1993-1-1 (6.61)	0,76	0,06	0,00	0,83 ≤ 1
EN 1993-1-1 (6.62)	0,74	0,04	0,00	0,78 ≤ 1

Conforme apresentado na tabela, considera-se verificada a segurança no que diz respeito ao estado limite último em análise.

6.2 Verificação da Segurança ao Estado Limite de Utilização da Contenção Periférica (ELS)

No que respeita ao comportamento da estrutura de contenção, em termos de estado limite de utilização, estima-se para a última fase de escavação uma deformação horizontal acumulada de cerca de 24mm.

Esta deformação estimada corresponde a uma deformação relativa de aproximadamente de H/500, pelo que se considera que o estado limite de serviço de deformação horizontal da parede se encontra verificado.

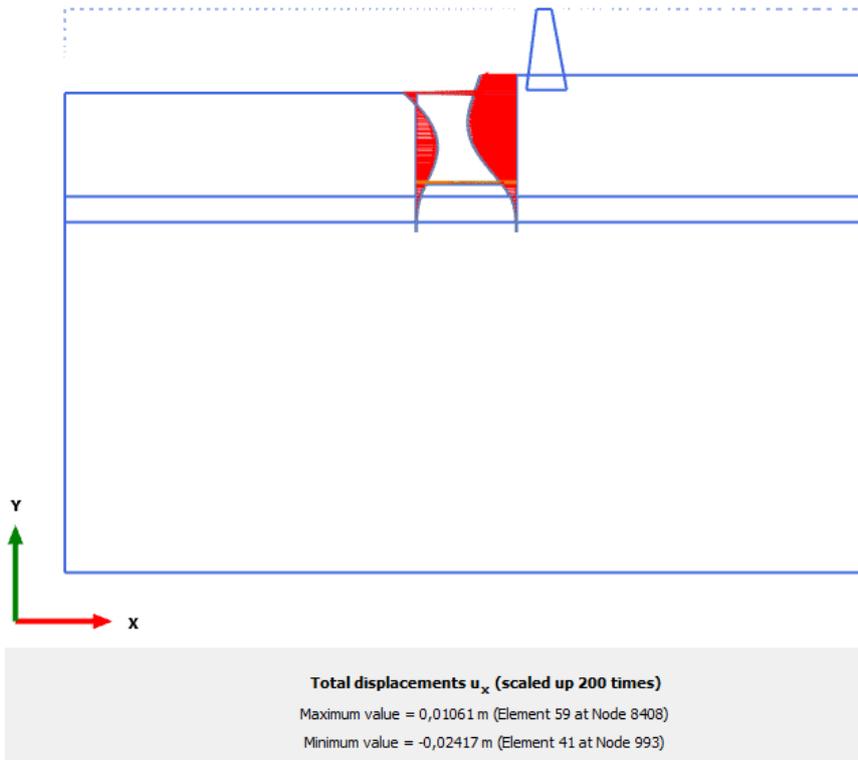


Figura 2 – Deslocamento máximo horizontal da cortina de estacas (24mm)

