

3.6 Análise de danos e Demolições

A avaliação de danos em interferências ao longo do traçado, assim como a definição de critérios de danos em estruturas ou infraestruturas situadas na vizinhança da obra, encontra-se desenvolvida no Tomo I – Geral, Volume 17 – Interferências ao Longo da Linha.

As interferências resultantes da construção do túnel que resultam em necessidade de demolições, encontram-se retratadas no Tomo I – Geral, Volume 27 – Demolições ao Longo da Linha, do presente Projeto de Execução.

3.7 Implantação

Conforme referido, o PV217 está localizado num lote sem ocupação no Parque Florestal de Monsanto, junto ao Acesso à Ponte 25 de Abril como representado na Figura 2.

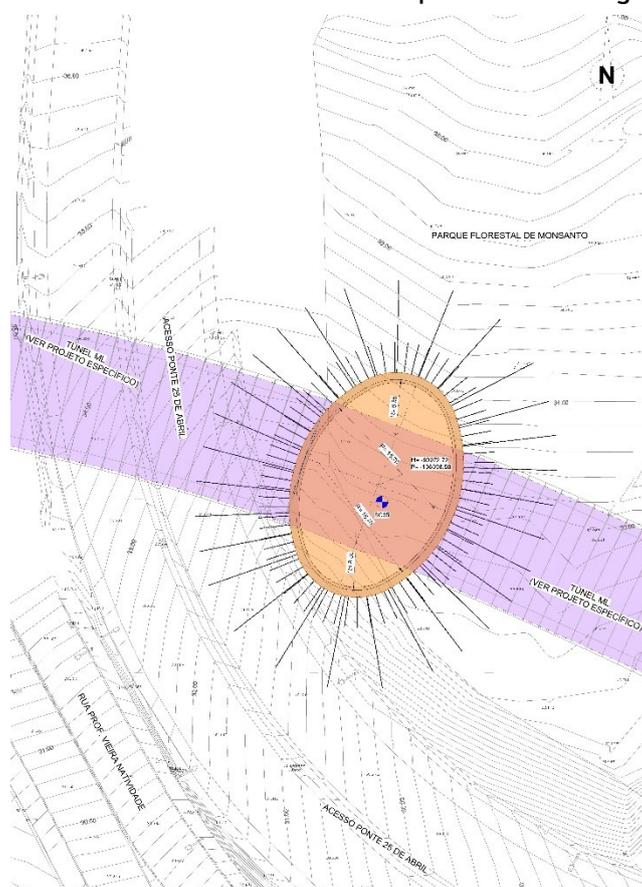


Figura 2 – Implantação do PV217.

De acordo com o programa preliminar, a implantação do poço de ventilação na localização mencionada acima foi condicionada pela necessidade de assegurar condições de fuga, segurança, ventilação e exaustão de fumos (em caso de incêndio) no troço em que se insere e pela necessidade de uma área livre suficiente para a implantação à superfície e para o estaleiro durante a construção.

A profundidade deste poço foi condicionada pela cota do túnel do metropolitano nesta zona.

Tendo em conta o recobrimento do poço e na proximidade a estruturas existentes, na próxima fase do projeto será efetuado um levantamento cuidadoso das interferências identificadas de modo a mitigar os danos associados à execução da obra.

3.8 Segurança

A atividade de prevenção de riscos profissionais tem uma matriz de referência baseada num conjunto de princípios gerais de prevenção:

1. Evitar os riscos;
2. Avaliar os riscos que não possam ser evitados;
3. Combater os riscos na origem;
4. Adaptar o trabalho ao trabalhador;
5. Ter em conta o estado de evolução técnica;
6. Substituir o que é perigoso pelo que é isento de perigo ou menos perigoso;
7. Planificar a prevenção;
8. Dar prioridade à prevenção coletiva em relação à individual;
9. Dar formação e instruções adequadas aos trabalhadores.

Estes princípios devem nortear a ação de todos os intervenientes durante todo o processo de construção. Apresenta-se nas peças desenhadas do presente Projeto de Execução, subscrivendo as orientações do Dono de Obra apresentadas no Programa Preliminar, desenho de notas gerais com uma lista não exaustiva de atividades que envolvem riscos especiais para a segurança e saúde dos trabalhadores decorrentes da execução do projeto e as ações para a prevenção de riscos associados à realização dos trabalhos.

Será da responsabilidade da Entidade Executante desenvolver o Plano de Segurança e Saúde, conforme indicado no Caderno de Encargos, e garantir a sua implementação na fase de execução da obra.

3.9 Arquitetónicos

O presente Projeto de Execução procura atingir as soluções técnicas mais adequadas e que estão compatibilizadas com o Projeto de Execução de Arquitetura (Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Arquitetura).

3.10 Compatibilidade com as Outras Especialidades

O presente Projeto de Execução está compatibilizado com todas as restantes especialidades, nomeadamente:

- Tomo I – Geral, Volume 2 – Traçado;
- Tomo I – Geral, Volume 3 – Via-Férrea;
- Tomo I – Geral, Volume 4 – Coluna seca;
- Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Arquitetura;
- Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Fluídos;
- Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Energia;
- Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Telecomunicações;
- Tomo VI – Poços de Ventilação, Volume 2 – Mecânica;

3.11 Ambiente

O projeto do “Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara” está sujeito a Avaliação de Impacte Ambiental, tendo sido desenvolvido um Estudo de Impacte Ambiental e emitida uma Declaração de Impacte Ambiental (DIA) que determina uma **Decisão Favorável Condicionada** ao cumprimento dos termos e condições expressas na DIA (processo de AIA n.º 3462), na qual se identificam as medidas de minimização gerais a implementar em fase de construção, a serem complementadas em fase do Projeto de Execução com a realização do Relatório de Conformidade Ambiental com o Projeto de Execução (RECAPE).

No desenvolvimento do presente Projeto de Execução foram consideradas as seguintes medidas:

- Cumprimento das áreas mínimas de intervenção, necessárias à realização dos trabalhos, apresentadas no Programa Preliminar do M.L.;
- Consideração das medidas e recomendações constantes da DIA (processo de AIA n.º 3462);
- Consulta dos elementos patenteados a concurso referentes à identificação de todas as interferências ao longo do traçado e ao levantamento dos respetivos cadastros para análise nas fases seguintes de projeto. Nesta fase realizou-se uma análise de risco aos edifícios interferidos seguindo a metodologia de avaliação de danos nos edifícios devido a escavações profundas e de túneis patenteada pelo M.L., que consta do Tomo I – Geral, Volume 17 – Interferências ao Longo da Linha, do presente Projeto de Execução;
- Adoção de faseamentos construtivos que promovam a realização dos trabalhos no prazo mais curto e que minimizem o impacto sobre a vida da comunidade e sobre o património edificado;
- Definição de um plano de instrumentação e observação, que se encontra enquadrado no presente Projeto de Execução em cada volume de frente de obra (a detalhar devidamente em Projeto de Execução), no sentido de detetar, quantificar e prevenir possíveis danos nas estruturas (por exemplo, ao nível do edificado) e deformações da superfície, bem como prevenir que eventuais deformações tenham consequências ao nível do edificado.

4 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 (ECO);
- 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.

5 MATERIAIS

As características dos materiais a adotar para as estruturas provisórias encontram-se resumidas nas tabelas seguintes.

Tabela 3 – Suporte Primário. Características dos materiais (1/2).

MATERIAIS	PROPRIEDADES	
BETÃO	BETÃO PROJETADO (VIA HÚMIDA)	C30/37 XC4(P) CL 0,4 DMAX.10 S5
	BETÃO MOLDADO EM GERAL	C30/37 XC4(P) CL 0,4 DMAX.22 S3
	BETÃO EM ESTACAS	C30/37 XC4(P) CL 0,4 DMAX.15 S4
	REGULARIZAÇÃO/ENCHIMENTO	C12/15 X0(P) CL 1.0 DMAX.25 S3
CALDA DE CIMENTO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS	f_{ck} MÍN. = 25 MPa
FIBRAS METÁLICAS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	1500 MPa
	COMPRIMENTO (EXTREMIDADE COM GANCHO)	< 35 MM
	ESBELTEZA, L/D	65
	CLASSE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA:	E700
FIBRA DE VIDRO	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO	≥ 2000 MPa
	CARGA NOMINAL DE ROTURA	430 kN
AÇO	CHAPAS E PERFIS METÁLICOS	S 355 JR
	PRE-ESFORÇO	EN 10138-3-Y1860S7-15,7-F1-C1
	CAMBOTAS TRELIÇADAS	A 500NR
	REDE ELETROSSOLDADA	A 500ER
	ENFILAGENS	S 355 JR
	MICROESTACAS	N80 API 5A
	Elementos de fixação metálica	CLASSE 8.8
PREGAGENS DE TUBO EXPANSIVO	CARGA MÍNIMA DE CEDÊNCIA	$P_y = 130$ kN
	TIPO DE AÇO	S 355 MC
No caso particular das soldaduras de elementos de construção metálica, a sua preparação e execução deverá obedecer ao estipulado no EC3 e NP EN 1090		

Tabela 4 – Suporte Primário. Características dos materiais (2/2).

MATERIAIS	PROPRIEDADES	
GEODRENOS	TUBO DE POLIETILENO RÍGIDO, CORRUGADO E RANHURADO	SN2
GEOTÊXIL DO GEODRENO	MASSA POR UNIDADE DE ÁREA (EN 9864)	150 g/m ²
	MASSA POR UNIDADE DE ÁREA (EN 9864)	2 mm
	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (EN ISO 10319)	4,5 KN/m
	ALONGAMENTO À CARGA MÁXIMA (EN ISO 10319)	80 %
	PUNÇAMENTO ESTÁTICO (EN ISO12236)	≥ 700 N
	RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO DINÂMICA (EN 918)	≤ 28 mm
	DURABILIDADE	[DURAÇÃO ESTIMADA DE, NO MÍNIMO, 25 ANOS EM TERRENO COM 4 < PH < 9 E TEMPERATURAS < 25°C (TEMPO DE EXPOSIÇÃO MÁXIMO DE 1 SEMANAS APÓS INSTALAÇÃO)]

Tabela 5 – Estruturas provisórias. Recobrimentos nominais das armaduras.

Recobrimentos Nominais (*)	
Elemento	Recobrimento nominal
Estacas	75 mm
Vigas de coroamento e distribuição	35 mm

(*) - Recobrimento mínimo + Margem de cálculo para as tolerâncias de execução = Recobrimento nominal.

6 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

6.1 Tempo de vida útil

Tendo em conta o preconizado no ponto 2.3 do Anexo Nacional da NP EN 1990, a estrutura é classificada com sendo uma estrutura de categoria do tempo de vida útil de projeto 5, a qual corresponde um valor indicativo de tempo de vida útil de projeto de 100 anos.

6.2 Classificação da obra de acordo com a sua importância

A classificação da obra de acordo com a sua importância é realizada de acordo com o especificado no Anexo Nacional da EN 1990.

Tendo em conta a definição das classes de consequências apresentada no quadro B.1 da EN 1990, as Estações e Poços de Ventilação são parte integrante de uma infraestrutura cujo colapso representa “consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; ou consequências económicas, sociais ou ambientais muito importantes”, pelo que se classificam como sendo da classe de consequência CC3.

6.3 Classe de inspeção

De acordo com a norma NP EN 13670 – 1 anexo G, quadro G.1, a estrutura da estação enquadra-se na classe de inspeção 3, para betão moldado.

6.4 Classe de fiabilidade

A Classe de Fiabilidade é definida de acordo com o anexo nacional da NP EN 1990. Tendo em conta que a obra definitiva é da classe de consequência CC3, de acordo com o ponto B.3.2 do Anexo B, fixa-se a classe de fiabilidade RC3 para a obra.

De acordo com a NP EN 1990, a classe de fiabilidade RC3 pode ser garantida através da combinação das medidas definidas nas alíneas c), d) e e) do ponto 2.2 (5), nomeadamente:

- c) medidas relacionadas com a gestão da qualidade;
- d) medidas destinadas a reduzir erros de projeto e de construção da estrutura, e erros humanos grosseiros;
- e) outras medidas relacionadas com as seguintes questões de projeto:
 - os requisitos gerais;
 - o grau de robustez (integridade estrutural);
 - a durabilidade, incluindo a escolha do tempo de vida útil de projeto;
 - a extensão e a qualidade das prospeções preliminares dos solos e as possíveis influências ambientais;
 - o rigor dos modelos mecânicos utilizados;
 - as disposições construtivas.

No presente projeto, encontram-se implementadas as medidas indicadas nas alíneas c) e d) acima, de acordo com o preconizado na alínea (b) do ponto B.1 e os procedimentos definidos nos pontos B.4 e B.5 do anexo B do ECO, nomeadamente:

- Nível de supervisão de projeto, DSL3, compatível com a classe de fiabilidade RC3, traduz-se num requisito de supervisão alargada, realizada por uma entidade distinta da que elaborou o Projeto;
- Nível de inspeção durante a execução, IL3, compatível com a classe de fiabilidade RC3, traduz-se num requisito de inspeção alargada, realizada por terceiros (Fiscalização da Empreitada de Construção).

Complementarmente, tendo em consideração a fixação do tempo de vida útil de projeto de 100 anos, o plano de prospeção geológico-geotécnica complementar previsto para a empreitada, a robustez das estruturas definitivas (nomeadamente a não integração e consideração de estruturas de contenção provisória nas estruturas definitivas) e outras disposições construtivas,

tais como a adoção de sistemas de impermeabilização, conjugadas com as especificações técnicas que integram as Cláusulas Técnicas do Caderno de Encargos, garante-se também a classe de fiabilidade RC3 no que se refere ao cumprimento das medidas indicadas da alínea e) acima. Nas situações omissas, que forem posteriormente identificadas, poderão ser elaboradas especificações técnicas e ensaios de verificação complementares aos já previstos no CE.

6.5 Categoria geotécnica da obra associada às estruturas de contenção

A NP EN 1997-1:2010 estabelece-se a Categoria Geotécnica (CG1, CG2 ou CG3) do projeto em função da sua complexidade e classe de consequências.

Tendo em conta a definição das classes de consequências apresentada no quadro B.1 da NP EN 1990, os Poços de Ventilação fazem parte integrante de uma infraestrutura cujo colapso representa “consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; ou consequências económicas, sociais ou ambientais medianamente importantes” (CC3), considera-se ainda que o grau de complexidade do projeto geotécnico é médio. Assim, para uma classe de consequências CC3, para uma complexidade do projeto geotécnico médio, atribui-se a Categoria Geotécnica 3 (CG3), de acordo com o Quadro IV do Anexo Nacional da NP EN 1997-1:2010.

7 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

7.1 Conceção geral

Os Poços de Ventilação (PV's) foram previstos aproximadamente a meia distância entre estações consecutivas e no término, em função das necessidades da ventilação dos túneis, mas o seu posicionamento é igualmente favorável na organização da escavação uma vez que estes servem, simultaneamente, como poços de ataque e permitem o avanço dos trabalhos em duas frentes.

O PV217 está localizado num lote sem ocupação no Parque Florestal de Monsanto, junto ao Acesso à Ponte 25 de Abril como representado na Figura 2.

A conceção subterrânea do poço PV217 apresenta uma geometria elíptica, com eixos de 18m e 25m, uma vez que intercepta o túnel no trecho das vias de resguardo. A profundidade do poço é cerca de 29m.

Para a escavação do poço, e atendendo à boa qualidade do maciço calcário abaixo dos tufos do Complexo Vulcânico de Lisboa, preconiza-se uma solução com recurso à escavação com contenção em betão projetado com pregagens até à base do poço. Ao nível dos aterros e dos tufos, a contenção será realizada com recurso a uma cortina de estacas secantes (com estacas primárias em betão simples e secundárias em betão armado). As estacas serão solidarizadas entre si através da viga de coroamento e de uma viga de cintagem a executar a cerca de 1,0m de altura desde a base da estaca.

7.2 Estruturas de contenção do poço de ventilação

A solução de contenção associada à fase de escavação do poço consiste na execução de uma cortina de estacas Ø800 mm secantes, em betão não armado, com um afastamento em planta de 1.20 m entre eixos, intercaladas por estacas igualmente de Ø800 mm em betão armado conforme representado na Figura 3. As estacas serão encabeçadas por uma viga de coroamento retangular 0.80x1.00 (LxH), em betão armado, de modo a assegurar a solidarização da cabeça das estacas.



Figura 3 – Corte tipo da solução de contenção do poço PV217.

Esta cortina de estacas vencerá o desnível entre a cota do terreno natural e a base dos tufos, garantindo um encastramento mínimo de 2,5m ao nível dos calcários CC1b. Perto da base da estaca deverá ser realizada uma viga de cintagem em betão armado, com 0,35x1,00 m (LxH), que assegurará o confinamento das estacas. Ao longo da viga de cintagem serão distribuídas pregagens radiais, em aço Ø25mm, com um comprimento mínimo de 12 m inseridas em furo Ø76 mm.

A viga de cintagem deverá ser ligada às estacas por intermédio de escarificação superficial do betão armado das estacas e instalação por selagem de varões nervurados com recurso a argamassa epóxi injetável de alto desempenho.

Abaixo da cortina de estacas, a superfície de escavação será revestida com 50 cm de betão projetado, reforçado com fibras metálicas, onde será distribuída uma malha de pregagens #2.00 x 2.00, distribuídas em quincôncio, em varão de aço tradicional Ø25 mm (A500 NR). Associado ao betão projetado, preconiza-se a instalação de geodrenos radiais numa malha de #2.00 x 2.00m, distribuídos em quincôncio.

Na Figura 4 apresenta-se as plantas tipo da estrutura de contenção provisória do poço.

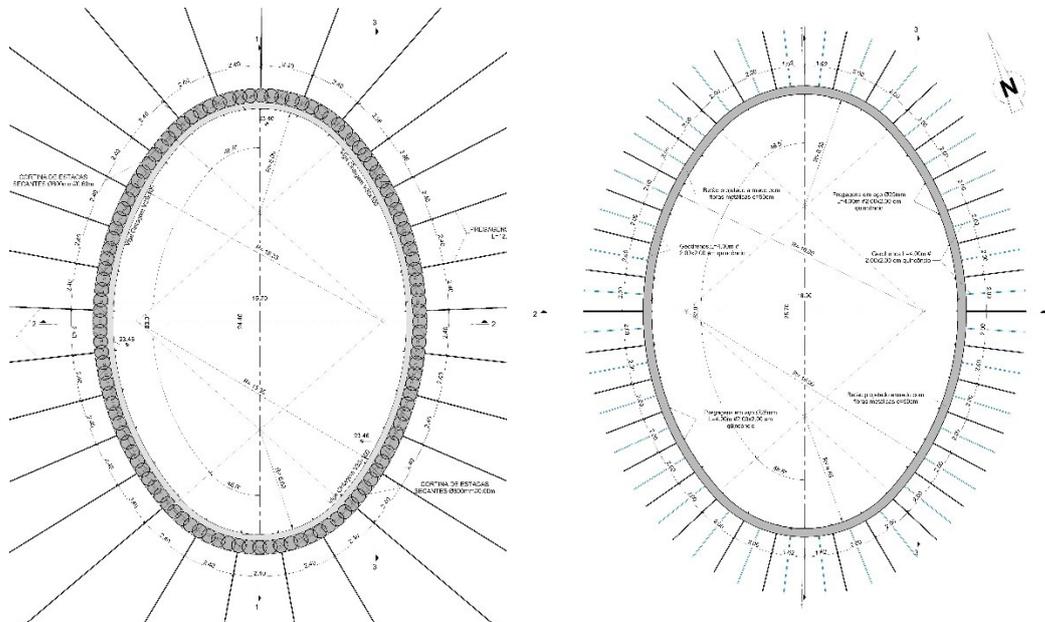


Figura 4 – Plantas da solução de contenção provisória do poço PV217 (cortina de estacas, à esquerda; betão projetado armado com fibras metálicas, à direita)

8 FASEAMENTO CONSTRUTIVO

O faseamento construtivo das estruturas provisórias e definitivas do poço segue, sucintamente, as seguintes fases construtivas:

1. Poço de ventilação:

O faseamento construtivo das estruturas provisórias e definitivas do poço segue, sucintamente, as seguintes fases construtivas:

- 1.1. Preparação da plataforma de trabalho e dos respetivos acessos, devidamente compatibilizada com a topografia do local;
 - 1.2. Execução das estacas com a profundidade necessária (mínimo de 2,50 m no calcário CC1b), recorrendo a tecnologia adequada, a partir da cota da plataforma de trabalho. Inclui as operações de furação, limpeza do furo, colocação da armadura e betonagem.
 - 1.3. Saneamento da cabeça das estacas e execução da viga de coroamento que solidariza todas as estacas da cortina. Inclui as operações de montagem e colocação das armaduras, cofragem e betonagem;
 - 1.4. Instalação e zeragem dos dispositivos de instrumentação;
 - 1.5. Escavação em avanços verticais de 2,00m até à cota de base da viga de cintagem, articulada com a instalação e zeragem dos dispositivos de instrumentação posicionados na face das estacas;
 - 1.6. Execução das pregagens de reforço ao nível da viga de cintagem, recorrendo a tecnologia de furação adequada. Inclui as operações de furação, diâmetro mínimo de 76 mm, limpeza do furo, colocação da armadura e selagem com calda de cimento.
 - 1.7. Execução da viga de cintagem que solidariza todas as estacas da cortina ao nível da sua base. Inclui as operações de montagem e colocação das armaduras, cofragem e betonagem.
 - 1.8. Escavação até à base das estacas;
 - 1.9. Execução de uma primeira camada de revestimento do poço, em betão projetado (via húmida) reforçado com fibras metálicas com 10 cm de espessura;
 - 1.10. Execução dos geodrenos. Inclui as operações de furação, limpeza e colocação;
 - 1.11. Execução das pregagens em aço tradicional. Inclui as operações de furação, limpeza, colocação da armadura e selagem com calda de cimento. Na zona da escavação do túnel de ligação, as pregagens serão de fibra de vidro;
 - 1.12. Execução da restante espessura do revestimento de betão projetado reforçado com fibras metálicas (via húmida), em camadas de 5 cm de espessura. Após a conclusão da projeção de betão, colocação das chapas das pregagens, anilha e porcas;
 - 1.13. Instalação e zeragem dos dispositivos de instrumentação posicionados na face do betão projetado, definidos no âmbito do plano de instrumentação e observação;
 - 1.14. Repetição dos passos 1.9 a 1.13 até o nível à cota de fundo do poço.
- ### 2. Emboque do túnel de via:
- 2.1. Execução do aterro provisório até ao nível do emboque do túnel de via;
 - 2.2. Execução do tratamento de emboquilhamento do túnel de via;
 - 2.3. Demolição do revestimento do poço;
 - 2.4. Execução de um avanço típico de calote (ver desenhos LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087000 0 a LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087002 0, LVSSA CBJ EP STR TUN

T81 DW 087000 0 e LVSSA CBJ EP STR TUN T81 DW 087002 0) com aplicação imediata de betão projetado para regularização;

- 2.5. Execução de pregagens e enfilagens (ver desenhos LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087000 0 a LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087002 0);
 - 2.6. Aplicação de betão projetado de modo a atingir a espessura de projeto.
 - 2.7. Execução de avanços típicos de túnel de via (ver desenhos LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087000 0 a LVSSA CBJ EP STR TUN 000 DW 087002 0).
3. Estrutura definitiva do poço:
- 3.1. Execução da impermeabilização do poço entre os revestimentos provisório e definitivo;
 - 3.2. Execução do revestimento definitivo em toda a altura do poço;
 - 3.3. Execução da estrutura interna do poço da forma tradicional:
 - i. Execução dos elementos verticais até ao piso do cais;
 - ii. Abertura de roços horizontais no revestimento definitivo do poço para descobrir os varões deixados para empalme das armaduras das lajes;
 - iii. Instalação de cimbres e cofragem do piso, seguido de montagem de armaduras;
 - iv. Betonagem do piso do cais numa única operação;
 - v. Repetição das fases i) a iv) para os restantes pisos até ao nível da cobertura;
 - vi. Execução da estrutura elevada do poço (paredes, piso de entrada e cobertura).
 - vii. Execução dos muros de suporte exteriores ao poço;
 - 3.4. Acabamentos

9 PROJETO DE ESTRUTURAS PROVISÓRIAS

9.1 Situações de projeto

9.1.1 Persistentes

No dimensionamento estrutural dos poços, serão consideradas as situações de projeto persistentes, correspondentes a condições normais de utilização, nomeadamente em cenários de estado limite último e estado limite de serviço.

9.1.2 Transitórias

No dimensionamento estrutural e geotécnico dos suportes provisórios dos poços serão consideradas as situações de projeto transitórias, correspondentes a condições temporárias e outras condições relacionadas com o faseamento construtivo da obra.

9.2 Análise e dimensionamento

O dimensionamento da estrutura de contenção provisória dos Poço de ventilação é realizado através de um modelo de cálculo numérico num programa de elementos finitos. Para o efeito, utilizaram-se os programas de cálculo automático Plaxis 2D e Plaxis 3D, os qual permitem a produção automatizada de uma malha de elementos finitos, triangulares de quinze nós, tendo esta sido refinada a zona próxima da escavação.

O comportamento mecânico do terreno foi simulado por uma lei de comportamento elástico linear perfeitamente plástico, sendo a rotura controlada pelo critério de Mohr-Coulomb, admitindo todos os materiais como isotrópicos.

As fronteiras foram definidas de modo a abranger a quase totalidade da zona onde se faz sentir a alteração do estado de tensão e deformação causada pela abertura das escavações. Em cada fase de escavação foram retirados os elementos correspondentes e, subsequentemente instaladas as medidas de suporte primário preconizadas, de modo a reproduzir um faseamento construtivo previsto em fase de construção.

No âmbito das análises numéricas, no que respeita às verificações de segurança e à determinação dos esforços de cálculo atuantes nos elementos estruturais a aplicação dos coeficientes parciais de segurança estabelecidos pelo EC7 será realizada através de ferramenta própria disponível no software utilizado (*Design Approach*).

9.3 Ações

As ações consideradas no projeto geotécnico das contenções provisórias foram definidas com base na regulamentação em vigor e no Normativo do Metropolitano. Encontram-se resumidas na Tabela 6.

Tabela 6 – Revestimento primário. Ações de dimensionamento.

AÇÕES	VALOR/OBSERVAÇÃO
CARGAS PERMANENTES	–
Peso próprio	$\gamma_{\text{betão}} = 25 \text{ kN/m}^3$
AÇÕES DO SOLO	–
Peso de Terras	Carregamento resultante do peso de terras atuante em cada secção de cálculo. Adotaram-se os pesos específicos definidos na parametrização geotécnica (ver Tomo I – Volume 6 – Estudo Geológico Geotécnico).
Tensões do solo	Adotaram-se os coeficientes de impulso horizontal definidos na parametrização geotécnica (ver Tomo I – Volume 6 – Estudo Geológico Geotécnico).
IMPULSOS DE ÁGUA	–
Impulsos hidrostáticos	$\gamma_{\text{água}} = 10 \text{ kN/m}^3$ Nível freático definido para cada secção de cálculo. Adotaram-se os níveis definidos no Tomo I – Volume 6 – Estudo Geológico Geotécnico).
SOBRECARGAS À SUPERFÍCIE	–
Carga de ocupação à superfície	10 kN/m ² por cada metro de profundidade
Carregamento imposto por edifícios (quando aplicável)	12 kN/m ² (por piso, incluindo o peso próprio)

9.4 Combinações de Ações

As combinações de ações baseiam-se nas regras definidas na NP EN 1990. Consideram-se as seguintes combinações de ações:

9.4.1 Estados Limite Últimos

Combinação fundamental geral:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Em que:

- E_d – valor de cálculo do efeito das ações;
- $\gamma_{G,j}$ – coeficiente parcial relativo à ação permanente j ;
- $G_{k,j}$ – valor característico da ação permanente j ;
- $\gamma_{Q,1}$ – coeficiente parcial relativo à ação variável de base de combinação 1;
- $Q_{k,1}$ – valor característico da ação variável de base de combinação 1;
- $\gamma_{Q,i}$ – coeficiente parcial relativo à ação variável i ;
- $\psi_{0,i}$ – coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;
- $Q_{k,i}$ – valor característico da ação variável acompanhante i .

Em Portugal, as verificações respeitantes a estados limites últimos de rotura estrutural ou de rotura do terreno (STR/GEO) em situações persistentes ou transitórias devem ser efetuadas utilizando a Abordagem de Cálculo 1.

Assim, no presente projeto considerou-se a abordagem de cálculo 1 nos seguintes elementos:

- Combinação 1: A1 “+” M1 “+” R1(caso geral)

- Combinação 2: A2 “+” M2 “+” R1(caso geral)

Para a verificação da segurança aos estados limite serão considerados valores dos coeficientes parciais de segurança relativos às ações, de acordo com o estipulado nas normas NP EN1990 e NP EN1991 (Tabela 7) e aos materiais, segundo os regulamentos correspondentes a cada um destes estados limites (Tabela 8 e Tabela 9).

Tabela 7 - Coeficientes parciais de segurança utilizados nas ações.

AÇÃO		SÍMBOLO	STR/GEO	
			A1	A2
Permanentes	Desfavorável	γ_G	1,35	1,00
	Favorável		1,00	1,00
Variável	Desfavorável	γ_Q	1,50	1,30
	Favorável		0,00	0,00

Tabela 8 - Coeficientes parciais de segurança utilizados na minoração das propriedades do terreno.

PARÂMETRO DO SOLO	SÍMBOLO	STR/GEO	
		M1	M2
Ângulo de atrito interno em tensões efetivas	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Coesão em tensões efetivas	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistência ao corte não drenada	γ_{cu}	1,00	1,40
Peso volúmico	γ_V	1,00	1,00

Tabela 9 - Coeficientes parciais de segurança relativos aos materiais para os estados limites últimos.

MATERIAL	SÍMBOLO	SITUAÇÕES PERSISTENTES E TRANSITÓRIAS
Betão	γ_C	1,50
Aço para cambotas metálicas e pregagens expansivas	γ_S	1,15

Os valores dos coeficientes parciais dos materiais para a verificação dos estados limites de utilização são iguais à unidade.

Para a verificação da segurança ao estado limite de levantamento global (UPL) serão considerados os valores dos coeficientes parciais de segurança:

Tabela 10 – Coeficientes parciais de segurança utilizados nas ações.

AÇÃO		SIMBOLO	UPL
Permanentes	Desfavorável	$\gamma_{G,dst}$	1,00
	Favorável	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Variável	Desfavorável	$\gamma_{Q,dst}$	1,50

Tabela 11 – Coeficientes parciais de segurança utilizados na minoração das propriedades do terreno.

PARAMETRO DO SOLO	SIMBOLO	UPL
Ângulo de atrito interno em tensões efetivas ^{a)}	$\gamma_{\phi'}$	1,25
Coesão em tensões efetivas	$\gamma_{c'}$	1,25
Resistência ao corte não drenada	γ_{Su}	1,40
^{a)} Este coeficiente é aplicado a $\tan \phi'$		

Para a verificação da segurança ao estado limite de levantamento hidráulico (HYD) serão considerados valores dos coeficientes parciais de segurança:

Tabela 12 – Coeficientes parciais de segurança utilizados nas ações.

AÇÃO		SIMBOLO	HYD
Permanentes	Desfavorável	$\gamma_{G,dst}$	1,35
	Favorável	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Variável	Desfavorável	$\gamma_{Q,dst}$	1,50

A verificação de segurança em relação aos estados limites últimos estruturais é garantida com base na seguinte condição:

$$S_d \leq R_d$$

em que S_d e R_d se designam respetivamente os valores de dimensionamento do esforço atuante e do esforço resistente.

Na consideração de um estado de limite de rotura ou de deformação excessiva de um elemento estrutural ou do terreno (STR ou GEO) deve ser feita a verificação de que:

$$E_d \leq R_d$$

em que E_d e R_d se designam respetivamente o valor de cálculo do efeito das ações e da capacidade resistente em relação a uma ação.

9.4.2 Estados Limite de Serviço

Combinação característica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Em que:

- E_d – valor de cálculo do efeito das ações;
- $G_{k,j}$ – valor característico da ação permanente j ;
- $\psi_{0,i}$ – coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;
- $Q_{k,1}$ – valor característico da ação variável de base de combinação 1;
- $Q_{k,i}$ – valor característico da ação variável acompanhante i .

Os coeficientes de redução ψ adotados são os definidos no **Tabela 13**:

Tabela 13 – Revestimento primário. Coeficientes de redução de ações

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas	0,70	0,50	0,30

Os valores dos coeficientes parciais dos materiais para a verificação dos estados limites de utilização são iguais à unidade.

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.

9.5 Verificação da Segurança

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.

Na verificação da segurança dos elementos estruturais dimensionados foi adotada a regulamentação nacional e internacional em vigor e, em situações não previstas regulamentarmente, metodologias de cálculo reconhecidamente comprovadas. Este procedimento permitiu a aferição das dimensões médias dos elementos dimensionados, cujos valores se encontram, naturalmente, condicionados pela validade das premissas consideradas.

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

Tabela 14 – revestimento primário. 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.

A verificação da segurança aos estados limites dos elementos de betão armado e elementos metálicos será efetuada de acordo com as disposições da NP EN 1992-1, NP EN 1993-1 e NP EN 1997-1. Apresenta-se na **Tabela 15** as verificações a efetuar para os diversos elementos.

Tabela 15 – 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	
	Cambotas	Estado limite último de resistência em flexão composta	
		Estado limite último de resistência ao corte	
	Vigas de coroamento e distribuição, em betão armado	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 (poço e túnel)	
		Estado limite último de resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas (poço e túnel)	
		Pregagens	Estado limite último de resistência à tração
		Estado limite último de resistência ao corte	
Verificação da Segurança ao Estado Limite de Utilização (ELS)	Poço e Túnel	Deformação horizontal das paredes do poço	
		Deslocamentos e convergências da secção do túnel	
	Terreno envolvente	Assentamentos das estruturas localizadas na zona de influência da escavação	

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As soluções apresentadas foram desenvolvidas a partir dos elementos base, citados no capítulo 2, assim como nos pressupostos igualmente referidos no presente documento. Neste contexto, conforme prática corrente em intervenções com o enquadramento geológico e geotécnico da presente, todos os elementos de base e todos os pressupostos considerados deverão ser confirmados em fase de obra. Qualquer retificação dos mesmos determinará a necessidade de averiguar as suas consequências ao nível da segurança das soluções propostas e, se justificável, proceder à sua revisão. Neste âmbito, consideram-se particularmente importantes os seguintes aspetos:

- a) A confirmação do zonamento geológico-geotécnico e hidrogeológico e confirmação das características geomecânicas dos terrenos interessados pela intervenção, para tal considera-se particularmente relevante a análise dos materiais recolhidos durante a escavação e furação;
- b) Confirmação da compatibilização das soluções propostas com as definidas no âmbito dos trabalhos das restantes especialidades em particular: Arquitetura, Estruturas e Drenagem.



Metropolitano de Lisboa

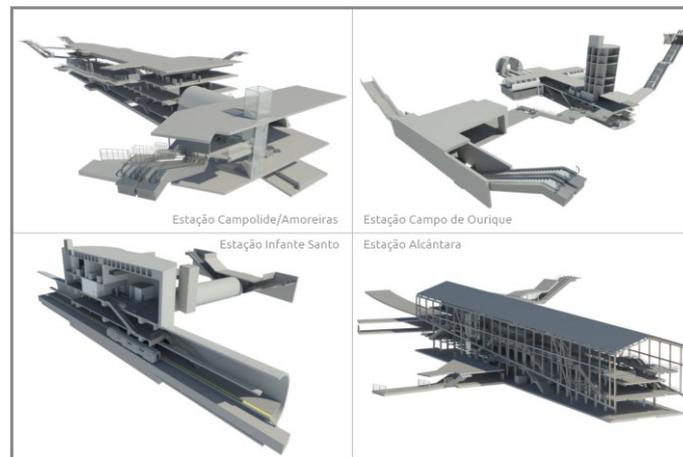


METRO DE LISBOA

LINHA VERMELHA ENTRE SÃO SEBASTIÃO E ALCÂNTARA

EMPREITADA DE CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PROLONGAMENTO DA LINHA

PROJETO DE EXECUÇÃO



TOMO VI – POÇOS DE VENTILAÇÃO

VOLUME 1 – POÇO DE VENTILAÇÃO PV217

NOTA DE CÁLCULO – ESTRUTURAS PROVISÓRIAS

Documento SAP:	LVSSA MSA AP STR PVE PV217 NC 086000 0
-----------------------	--

	Nome	Assinatura	Data
Elaborado	André Henriques		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

1	OBJETIVO E ÂMBITO.....	3
2	SISTEMAS DE UNIDADES.....	4
3	REGULAMENTAÇÃO/NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA TÉCNICA.....	5
4	MODELOS DE CÁLCULO	7
4.1	Estruturas de contenção do poço de ventilação.....	7
4.1.1	Considerações gerais.....	7
4.1.2	Modelo de cálculo da estrutura de contenção	7
5	CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA.....	8
5.1	Descrição geral.....	8
5.2	Estado limite último (ELU).....	9
5.2.1	Resistência à flexão de elementos	9
5.2.2	Resistência ao corte de elementos	9
5.2.3	Resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	10
5.2.4	Resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado	12
5.3	Estado limite de serviço (ELS).....	13
6	RESUMO DAS VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA.....	14
6.1	Estado Limite Último (ELU).....	14
6.1.1	Resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	14
6.1.2	Resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado	14
6.2	Estado Limite de Serviço (ELS).....	15

1 OBJETIVO E ÂMBITO

O presente documento diz respeito ao desenvolvimento, ao nível de **Projeto de Execução**, da **Nota de Cálculo das estruturas provisórias do Poço de Ventilação PV217** no âmbito do Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, que é parte integrante do **Tomo VI – Poços de Ventilação do Volume 2 – Estruturas**.

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 kilopascals (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

Para o dimensionamento das estruturas de suporte provisórias, foram utilizadas metodologias de cálculo distintas para o poço de ventilação e o túnel de ligação, seguindo o exposto nos subcapítulos seguintes.

4.1 Estruturas de contenção do poço de ventilação

4.1.1 Considerações gerais

O dimensionamento da estrutura de contenção provisória do poço de ventilação foi realizado através de um modelo de cálculo numérico num programa de elementos finitos. Para o efeito, utilizou-se o programa de cálculo automático Plaxis 3D, o qual permite a produção automatizada de uma malha de elementos finitos, triangulares de quinze nós, tendo esta sido refinada a zona próxima da escavação. O comportamento mecânico do terreno foi simulado por uma lei de comportamento elástico linear perfeitamente plástico, sendo a rotura controlada pelo critério de Mohr-Coulomb, admitindo todos os materiais como isotrópicos.

As fronteiras foram definidas de modo a abranger a quase totalidade da zona onde se faz sentir a alteração do estado de tensão e deformação causada pela abertura das escavações. Em cada fase de escavação foram retirados os elementos correspondentes e, subsequentemente instaladas as medidas de suporte primário preconizadas, de modo a reproduzir um faseamento construtivo previsto em fase de construção. A sequência de construção foi simulada mediante a remoção, introdução de elementos e a alteração das suas propriedades. O efeito tridimensional é modelado através da consideração da axissimetria do modelo.

4.1.2 Modelo de cálculo da estrutura de contenção

Na modelação da estrutura de contenção provisória foram utilizados elementos estruturais com as propriedades de resistência, inércia e deformabilidade, representativas dos diversos elementos de suporte, neste caso, as paredes em betão projetado. Estes elementos encontram-se dispostos no contorno da escavação, e a sua simulação permite a avaliação dos esforços atuantes ao longo dos mesmos.

O betão projetado a aplicar no contorno da escavação, foi modelado através de elementos *plate* com comportamento elástico-plástico perfeito, com as propriedades mecânicas representativas da sua resistência e deformabilidade. Na Figura 1 apresenta-se o modelo de cálculo adotado.

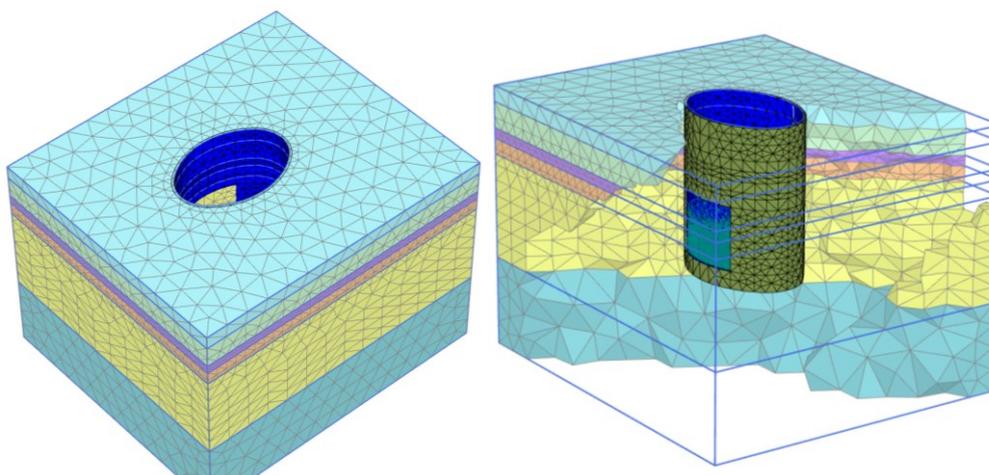


Figura 1 – Modelo de cálculo do poço de ventilação PV217.

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.

Na verificação da segurança dos elementos estruturais dimensionados foi adotada a regulamentação nacional e internacional em vigor e, em situações não previstas regulamentarmente, metodologias de cálculo reconhecidamente comprovadas. Este procedimento permitiu a aferição das dimensões médias dos elementos dimensionados, cujos valores se encontram, naturalmente, condicionados pela validade das premissas consideradas.

Com vista à verificação de segurança dos diversos elementos, as ações foram agrupadas nas combinações de ações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – revestimento primário. 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.

A verificação da segurança aos estados limites dos elementos de betão armado e elementos metálicos será efetuada de acordo com as disposições da NP EN 1992-1, NP EN 1993-1 e NP EN 1997-1. Apresenta-se na Tabela 2 as verificações a efetuar para os diversos elementos.

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
	Cambotas	Estado limite último de resistência em flexão composta
		Estado limite último de resistência ao corte
	Vigas de coroamento e distribuição, em betão armado	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 (poço e túnel)
		Estado limite último de resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas (poço e túnel)
		Estado limite último de resistência à tração
	Pregagens	Estado limite último de resistência ao corte
Verificação da Segurança ao Estado	Poço e Túnel	Deformação horizontal das paredes do poço
		Deslocamentos e convergências da secção do túnel

	TIPO DE VERIFICAÇÃO	
Limite de Utilização (ELS)	Terreno envolvente	Assentamentos das estruturas localizadas na zona de influência da escavação

5.2 Estado limite último (ELU)

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 em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas

Com referido Error! Reference source not found. foram desenvolvidos modelos o objetivo de aferir os esforços aos quais os diversos elementos que constituem o suporte primário do túnel e do poço estarão sujeitos durante as várias etapas de construção.

No dimensionamento estrutural do suporte primário em betão projetado foi considerada a contribuição resultante da inclusão de fibras metálica. Genericamente, as fibras metálicas conferem ao betão projetado uma ductilidade e uma homogeneidade de comportamento (resultado da distribuição homogénea das fibras), que melhora a sua performance e sua produtividade em obra, quando comparado com as soluções sem recurso a reforço ou com recurso a malha electrossoldada tradicional.

Para a verificação dos ELU para uma aplicação em suporte primário, as fibras contribuem para um incremento de capacidade resistente a baixo esforço axial. A formulação para a determinação da capacidade resistente com a inclusão de fibras é dada pela seguinte formulação (segundo Bekeart):

$$\sigma_{1d} = 1.0 \cdot f_{cm} \cdot \max \{1.6m - d; 1.0\} (\epsilon_{ctm} \text{ used})$$

$$= 0.5 \cdot \sigma_{2d} (\epsilon_{ctm} \text{ not used})$$

$$\sigma_{2d} = \alpha_{sys} \cdot \alpha_{char} \cdot \kappa_h \cdot \alpha_{R1} \cdot f_{R1,m} / \gamma_{ct}^f$$

$$\sigma_{3d} = \alpha_{sys} \cdot \alpha_{char} \cdot \kappa_h \cdot \alpha_{R3} \cdot f_{R3,m} / \gamma_{ct}^f$$

σ_{2d}	is the design value of the steel fiber reinforced concrete in tension, based on $f_{R1,m}$
σ_{3d}	is the design value of the steel fiber reinforced concrete in tension, based on $f_{R4,m}$
α_{sys}	is the coefficient taking account of effects due to fibre orientation, size and load redistribution for the selected application (if applicable)
$f_{R1,m}$	is the mean residual flexural strength of steel fiber concrete according to EN 14651, at a crack mouth opening displacement of 0.5 mm
$f_{R3/4,m}$	is the mean residual flexural strength of steel fiber concrete according to EN 14651, at a crack mouth opening displacement of 2.5 / 3.5 mm
d	is the effective depth of a cross-section,
κ_h	is a coefficient to compensate for scaling effects
α_{char}	is the coefficient taking account of the variation of the material properties for the selected application
γ_{ct}^f	is the partial factor for steel fiber concrete in tension

Na Figura 2 e Figura 3 apresenta-se a aplicação da formulação acima referida na lei constitutiva que relaciona a evolução da tensão no betão reforçado com fibras com a deformação.

Concrete			
concrete acc. EN 206-1	C30/37		
f_{ck}	30	[N/mm ²]	(EN 1992-1-1)
$f_{ctm} / f_{ctk,0.05}$	2,9 / 2,0	[N/mm ²]	(EN 1992-1-1)
α_{cc}	0,85	[-]	
η	0,95	[-]	
Reinforcement Concept Top Reinforcement			
Fibre Reinforcement			
fibre type	Dramix 4D 65/60BG		(EN 14889-1: System '1' - Structural Use)
$f_{R1,m}$	4,30	[N/mm ²]	(residual flexural strength at CMOD ₁ according to EN 14651)
$f_{R3,m}$	5,29	[N/mm ²]	(residual flexural strength at CMOD ₃ according to EN 14651)
Conventional Reinforcement			
yield strength f_{yk}	500	[N/mm ²]	
E-modulus	200.000	[N/mm ²]	

Figura 2 – Parâmetros de modelação da contribuição das fibras metálicas (segundo Bekeart Moment Capacity) (1/2)

Moment Capacity

Concrete			
$\eta \cdot f_{cd}$	16,2	[N/mm ²]	
ϵ_{cu}	3,5	[‰]	
λ	0,80	[-]	
Steel Fibre Reinforcement			
$f_{R1,m}$	4,30	[N/mm ²]	
$f_{R3,m}$	5,29	[N/mm ²]	
κ_{char}	0,90	[-]	
$f_{Rt1,d}$	1,03	[N/mm ²]	
$f_{R3,d}$	1,24	[N/mm ²]	
ϵ_{fu}	25	[‰]	
Steel Reinforcement			
f_{yd}	435	[N/mm ²]	
E_s	200000	[N/mm ²]	
ϵ_{su}	25	[‰]	

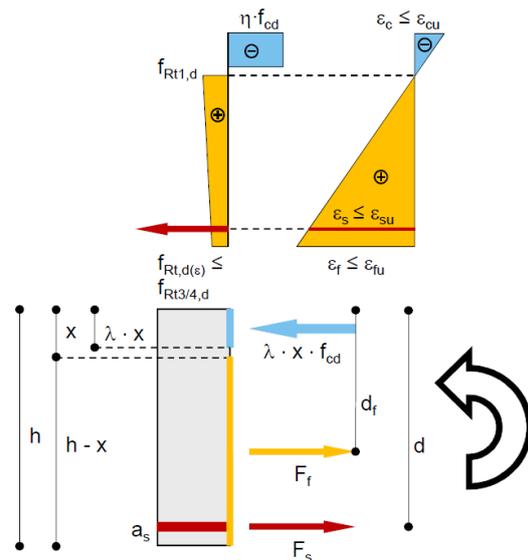


Figura 3 – Parâmetros de modelação da contribuição das fibras metálicas (segundo Bekeart Moment Capacity) (2/2)

A verificação do ELU de resistência em flexão composta para o betão projetado terá assim de verificar as seguintes condições:

Em compressão:

$$N_{Ed} \leq N_{max} = A \times f_{cd}$$

Em tração:

$$N_{Ed} \leq N_{min} = A \times f_{ctd}$$

Em flexão composta:

$$M_{Ed} \leq M_{max} = \pm (f_{cd} - f_{ctm}) \times \frac{I}{t}$$

$$N_{Ed} \leq N (M_{max}) = A \times (f_{cd} + f_{ctd})$$

Em que:

N_{max} – Esforço axial máximo de compressão do betão

N_{min} – Esforço axial máximo de tração do betão

A – Área da secção transversal

I – Momento de inércia da secção

f_{cd} – Resistência à compressão uniaxial do betão de projeto

f_{ctd} – Resistência à tração do betão de projeto

5.2.4 Resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado

A verificação do ELU de resistência ao esforço transversal/corte para o betão projetado terá assim de verificar as seguintes condições:

Em compressão:

$$N_{Ed} \leq (f_{cd} \times A) - \left(\frac{9 \times V_{Ed}^2}{4 \times f_{cd} \times A} \right)$$

Em tração:

$$N_{Ed} \leq (f_{ctm} \times A) - \left(\frac{9 \times V_{Ed}^2}{4 \times f_{ctd} \times A} \right)$$

Para o esforço transversal/corte combinado com esforço axial:

$$V_{RdF} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d$$

Em que:

A – Área da secção transversal de betão projetado

I – Momento de inércia da secção

f_{cd} – Resistência à compressão uniaxial do betão de projeto

f_{ctd} – Resistência à tração do betão de projeto

f_{Ftuk} – valor característico da tensão residual para uma abertura de fendas $w_u=1,5\text{mm}$, em MPa, determinado a partir da equação seguinte:

$$f_{Ftuk} = f_{Ftsk} - \frac{w_u}{CMOD3} \cdot (f_{Ftsk} - 0,5 \times f_{r3k} + 0,2 \times f_{r1k})$$

Em que:

$CMOD3 = 2,5 \text{ mm}$;

f_{Ftsk} = valor característico da tensão residual em estado limite de serviço, sendo o seu valor obtido a partir da expressão

$$f_{Ftsk} = 0,45 \times f_{r1k}$$

A variável f_{ctk} , representa o valor característico da resistência à tração do betão.

O valor de V_{Rd} resistente será o maior entre V_{RdF} e $V_{Rd,Fmin}$, calculado a partir da seguinte expressão:

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Em que:

$$v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

5.3 Estado limite de serviço (ELS)

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

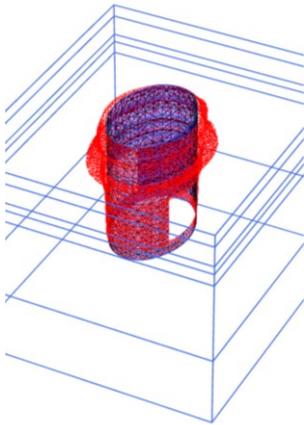
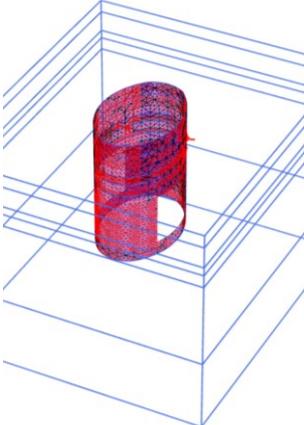
6 RESUMO DAS VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

6.1 Estado Limite Último (ELU)

6.1.1 Resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas

Na Tabela 3 apresentam-se as verificações ao ELU de resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas, para a fase condicionante. As imagens ilustrativas dos esforços extraídas do programa de cálculo não se encontram majorados, mas nas verificações de segurança esses valores já se encontram afetados pelo respetivo fator de majoração.

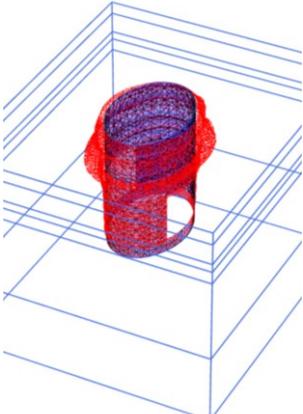
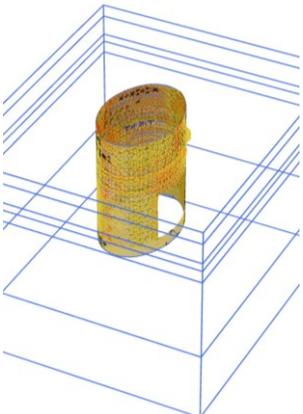
Tabela 3 – Verificação da resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas no poço de ventilação.

Suporte primário em betão projetado (e=0.50m)		
 <p>Axial forces N_y (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times) Maximum value = 2,174 kN/m (Element 1796 at Node 2171) Minimum value = -961,2 kN/m (Element 521 at Node 5967)</p> <p>N_{sd} (kN/m)</p>	 <p>Bending moments M_{zj} (scaled up 0,0500 times) Maximum value = 16,72 kN m/m (Element 649 at Node 5468) Minimum value = -16,18 kN m/m (Element 565 at Node 5956)</p> <p>M_{sd} (kNm/m)</p>	<p><u>Esforços condicionantes:</u> $M_{sd} = 16.72 \times 1.35 = 22.57 \text{ kNm}$ $N_{sd} \text{ (kN)} = 20 \text{ kN}$</p> <p><u>Esforço resistente:</u> $M_{rd} = 134.18 \text{ kNm} > 22.57 \text{ kNm}$ verifica</p>

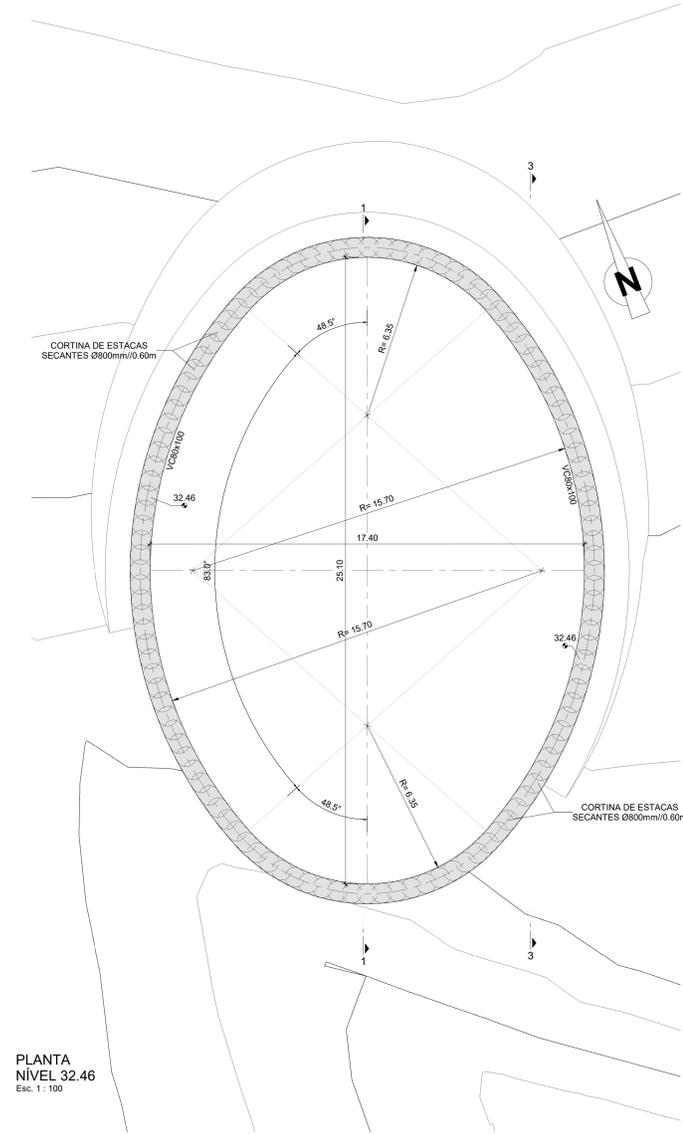
6.1.2 Resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado

Na Tabela 4 apresentam-se as verificações ao ELU de resistência ao esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas para a fase condicionante. Os esforços apresentados nos diagramas de verificação encontram-se majorados. As correspondentes imagens ilustrativas dos esforços não-majorados extraídas do programa de cálculo, são também apresentados no mesmo conjunto de tabelas.

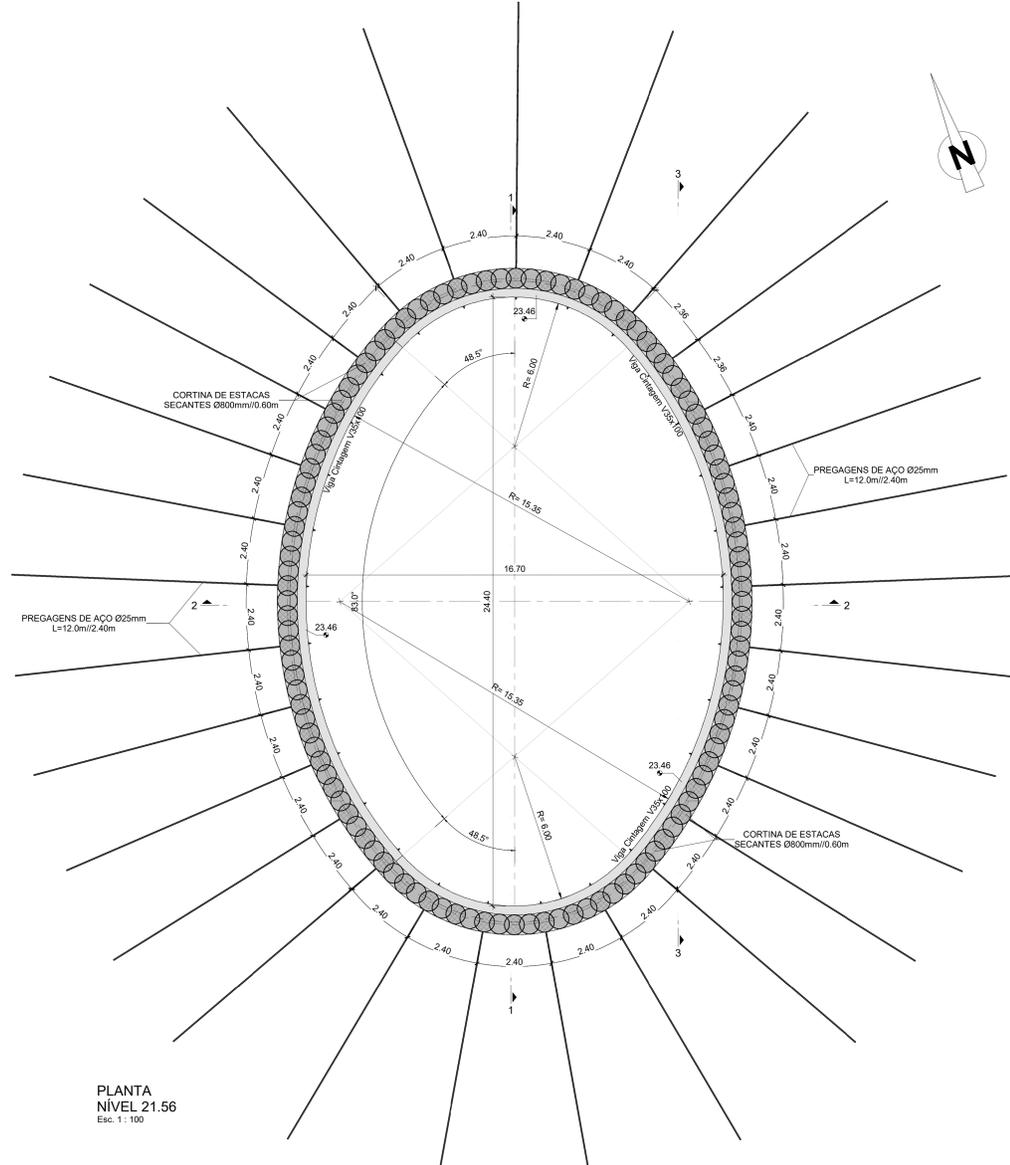
Tabela 4 - Verificação da resistência do esforço transversal/corte do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas no poço de ventilação (1/2).

Suporte primário em betão projetado (e=0.50m)		
 <p>Axial forces N_x (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times) Maximum value = 2,174 kN/m (Element 1796 at Node 2171) Minimum value = -961,2 kN/m (Element 521 at Node 5967)</p> <p>N_{sd} (kN/m)</p>	 <p>Envelope of Shear forces Q_x (scaled up 0,0200 times) Maximum value = 91,35 kN/m (Element 694 at Node 4847) Minimum value = -92,99 kN/m (Element 690 at Node 4791)</p> <p>V_{sd} (kNm/m)</p>	<p>Esforços condicionantes: $V_{sd} = 92.99 \times 1.35 = 125.54 \text{ kN}$ $N_{sd} \text{ (kN)} = 20 \text{ kN}$</p> <p>Esforço resistente: $V_{rd} = 246.90 \text{ kN} > 125.54 \text{ kN}$ verifica</p>

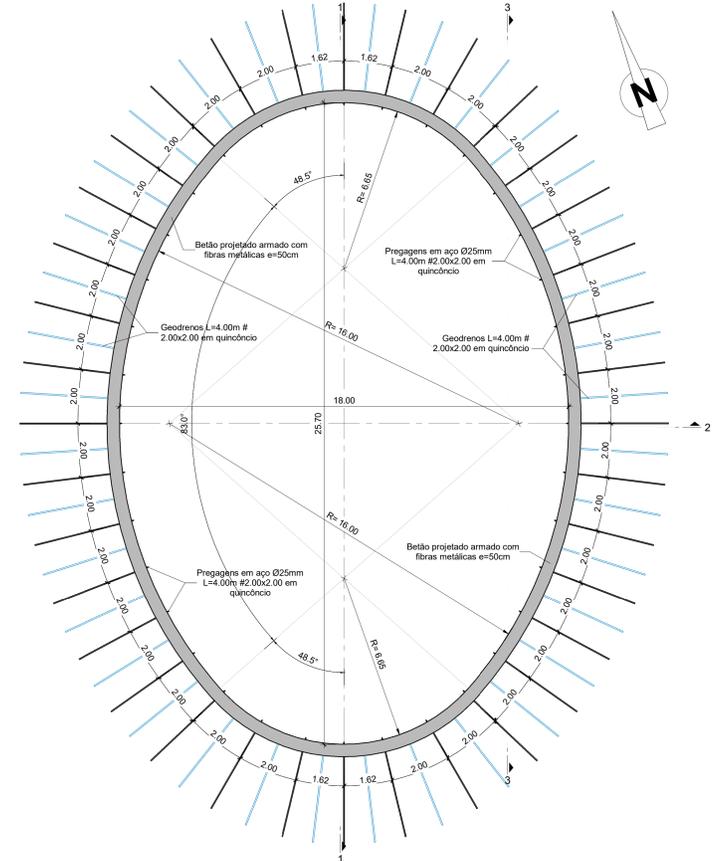
6.2 Estado Limite de Serviço (ELS)



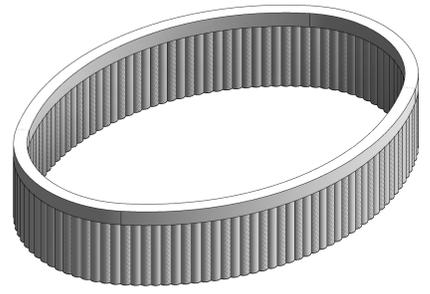
PLANTA NÍVEL 32.46 Esc. 1: 100



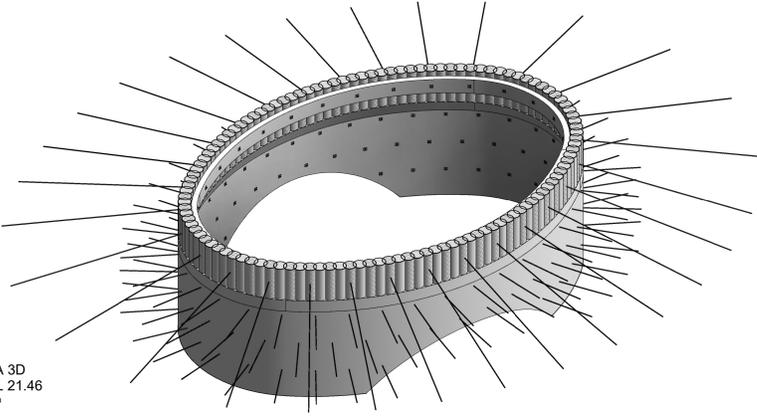
PLANTA NÍVEL 21.56 Esc. 1: 100



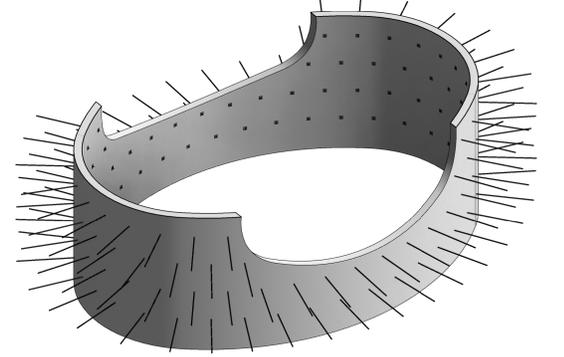
PLANTA NÍVEL 2.25 Esc. 1: 100



VISTA 3D NÍVEL 32.46 s / escala



VISTA 3D NÍVEL 21.46 s / escala



VISTA 3D NÍVEL 2.25 s / escala

- LEGENDA:**
- CONTENÇÃO PERIFÉRICA**
- Cortina de estacas secantes Ø800mm/0.60m
 - Betão projetado armado com fibras metálicas
 - Geodrenos
 - Pregagens de aço Ø25mm

ALTERAÇÕES		DATA	AI	RF	
0	Emissão inicial		DES	VERIF.	
PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA S. SEBASTIÃO - ALCÁNTARA PROJETO DE EXECUÇÃO ESTRUTURAS POÇO DE VENTILAÇÃO 217 ESTRUTURAS PROVISÓRIAS PLANTAS DE DIMENSIONAMENTO					
Data: _____ Aprov: _____ Verif: _____ Proj: _____ Des: _____	Metropolitano de Lisboa		Escala: Des. nº 134838 F. / / Alter: _____ Substituído: _____ Nº SAP: _____ Versão: _____ Folha: _____	MOTAENÇIL ENGENHARIA COOP JE.T. OTEM	
Aprov: PIP 04/10/2024 Verif: RT 04/10/2024 Proj: AM AS CM PM 04/10/2024 Des: AH 04/10/2024	COMA JET J.A.C.M. TA PROJECTO Escala: 1/100 Folha: 02/06		Desenhado por: LVSSA MSA PE STR PVE PV217 DW 086050 D (02-05) Alter: 04/10/2024		

Desenho elaborado/alterado sobre as bases editadas do Programa Preliminar de Dimensionamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara do Metropolitano de Lisboa, E.P.E.