

8 FASEAMENTO CONSTRUTIVO

8.1 Poço de ventilação

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

1. Preparação da plataforma de trabalho e dos respetivos acessos, devidamente compatibilizada com a topografia do local;
2. Execução das estacas com a profundidade necessária (mínimo de 2 m no basalto), 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.
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;
4. Instalação e zeragem dos dispositivos de instrumentação;
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;
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.
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;
8. Escavação até à base das estacas;
9. Execução de uma primeira camada de revestimento do poço, em betão projetado (via húmida) reforçado com fibras metálicas com 10 cm de espessura;
10. Execução dos geodrenos. Inclui as operações de furação, limpeza e colocação;
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;
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;
13. Instalação e zeragem dos dispositivos de instrumentação posicionados na face do betão projetado, definidos no âmbito do plano de instrumentação e observação;
14. Escavação em avanços verticais de 2,00m e repetição dos passos 1.9 a 1.13 até o nível do emboquilhamento do túnel;
15. Execução do tratamento de emboquilhamento do túnel de ligação;
16. Repetição dos passos 1.9 a 1.13 até à cota de fundo do poço, em avanços compatibilizados com a escavação do túnel de ligação.
17. Execução da impermeabilização do poço entre os revestimentos provisório e definitivo;
18. Execução do revestimento definitivo em toda a altura do poço, incluindo a demolição da viga de cintagem provisória;
19. Execução da estrutura interna do poço da forma tradicional:
 - a) Execução dos elementos verticais até ao piso do cais;
 - b) Abertura de roços horizontais no revestimento definitivo do poço para descobrir os varões deixados para empalme das armaduras das lajes;
 - c) Instalação de cimbres e cofragem do piso, seguido de montagem de armaduras;
 - d) Betonagem do piso do cais numa única operação;
 - e) Repetição das fases a) a d) para os restantes pisos até ao nível da cobertura enterrada;
 - f) Execução da estrutura elevada do poço (paredes, piso de entrada e cobertura).

- g) Execução dos muros de suporte exteriores ao poço;
- h) Colocação de aterro sobre os muros exteriores;
- i) Acabamentos.

8.2 Túnel de ligação

O faseamento construtivo das estruturas provisórias (suporte primário) e definitivas (revestimento definitivo) do túnel de ligação segue, sucintamente, as seguintes fases construtivas:

- 1.1. Escavação e execução da estrutura de calote:
 - 1.1.1. Execução de um chapéu troncocónico de enfilagens metálicas;
 - 1.1.2. Escavação de 1 avanço de 100cm nas bancadas laterais (fase 1), com demolição do revestimento do poço;
 - 1.1.3. Execução de uma camada de 5cm em betão projetado para regularização da superfície exposta pela escavação da calote;
 - 1.1.4. Instalação de cambotas metálicas treliçadas;
 - 1.1.5. Execução de geodrenos e pregagens (radiais e de frente, onde aplicável) e instalação de prismas de convergências para monitorização da deformação do suporte primário;
 - 1.1.6. Aplicação sucessiva de camadas de 5cm de betão projetado do suporte primário até se atingir a espessura total de projeto;
 - 1.1.7. Escavação de 1 avanço de 100cm na bancada central (fase 2);
 - 1.1.8. Repetição dos passos 1.1.4 a 1.1.6;
 - 1.1.9. Repetição dos passos 1.1.2 a 1.1.8 (avanço típico de calote) até ao final do túnel de ligação;
 - 1.1.10. Execução da parede de fecho, incluindo execução de pregagens e geodrenos.
- 1.2. Escavação e execução do 1º rebaixo:
 - 1.2.1. Escavação sub-vertical na região do poço, em avanços de 2.00m, até ao nível do 1º rebaixo, com execução imediata de uma camada de 5cm em betão projetado para regularização da superfície exposta pela escavação;
 - 1.2.2. Execução das pregagens radiais e geodrenos na região do poço;
 - 1.2.3. Aplicação sucessiva de camadas de 5cm de betão projetado do suporte primário do poço até se atingir a espessura total de projeto;
 - 1.2.4. Escavação com avanço de 4,00m na região lateral (fase 3), com aplicação imediata de uma camada de 5cm de betão projetado para regularização nas bancadas laterais;
 - 1.2.5. Execução de geodrenos e pregagens (radiais e de frente, onde aplicável) e instalação de prismas de convergências para monitorização da deformação do suporte primário;
 - 1.2.6. Aplicação sucessiva de camadas de 5cm de betão projetado do suporte primário do túnel até se atingir a espessura total de projeto;
 - 1.2.7. Escavação com avanço de 4.00m na região central (fase 4);
 - 1.2.8. Repetição dos passos 1.2.1 a 1.2.7 (avanço típico de rebaixo) até ao final do túnel de ligação;
 - 1.2.9. Execução da parede de fecho, incluindo execução de pregagens e geodrenos.
- 1.3. Execução do tratamento de emboque do túnel de via;
- 1.4. Escavação e execução da soleira:
 - 1.4.1. Escavação sub-vertical na região do poço, em avanços de 2.00m, até ao nível do fundo do poço, com execução imediata de uma camada de 5cm em betão projetado para regularização da superfície exposta pela escavação;
 - 1.4.2. Execução das pregagens radiais e geodrenos na região do poço;
 - 1.4.3. Aplicação sucessiva de camadas de 5cm de betão projetado do suporte primário do poço até se atingir a espessura total de projeto;

-
- 1.4.4. Escavação com avanço de 4,00m, com aplicação imediata de uma camada de 5cm de betão projetado para regularização;
 - 1.4.5. Aplicação sucessiva de camadas de 5cm de betão projetado do suporte primário do túnel até se atingir a espessura total de projeto;
 - 1.4.6. Repetição dos passos 1.4.3 a 1.4.5 (avanço típico de soleira) até ao final do túnel de ligação;
 - 1.4.7. Execução da parede de fecho, incluindo execução de pregagens e geodrenos.
 - 1.5. Execução da impermeabilização do túnel entre o suporte primário e o revestimento definitivo;
 - 1.6. Execução do revestimento definitivo do túnel;
 - 1.7. Execução da estrutura interna do túnel da forma tradicional:
 - a) Execução dos elementos verticais até ao piso do cais;
 - b) Abertura de roços horizontais no revestimento definitivo do poço para descobrir os varões deixados para empalme das armaduras das lajes;
 - c) Instalação de cimbres e cofragem do piso, seguido de montagem de armaduras;
 - d) Betonagem do piso do cais numa única operação;
 - e) Repetição das fases a) a d) para os restantes pisos até ao nível da cobertura;
 - f) Execução da estrutura elevada do poço (paredes, piso de entrada e cobertura).
 - 1.8. Execução dos muros de suporte exteriores ao poço;
 - 1.9. Colocação de aterro sobre os muros exteriores;
 - 1.10. 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.

A modelação numérica será efetuada considerando um modelo 3D por ter os impulsos de terras muito desequilibrados devido à presença do aqueduto e dos reservatórios da EPAL.

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 8.

Tabela 8 – 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 9) e aos materiais, segundo os regulamentos correspondentes a cada um destes estados limites (Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 9 - 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 10 - 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 11 - 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 12 - Coeficientes parciais de segurança utilizados nas ações.

AÇÃO		SÍMBOLO	UPL
Permanentes	Desfavorável		1,00

	Favorável	$\gamma_{G,dst}$ $\gamma_{G,stb}$	0,90
Variável	Desfavorável	$\gamma_{Q,dst}$	1,50

Tabela 13 – 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 14 – 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 15**:

Tabela 15 – 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 16 – 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 17** as verificações a efetuar para os diversos elementos.

Tabela 17 – 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
Deformação horizontal das paredes do poço		
Verificação da Segurança ao Estado Limite de Utilização (ELS)	Poço e Túnel	Deslocamentos e convergências da secção do túnel
		Assentamentos das estruturas localizadas na zona de influência da escavação
	Terreno envolvente	

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

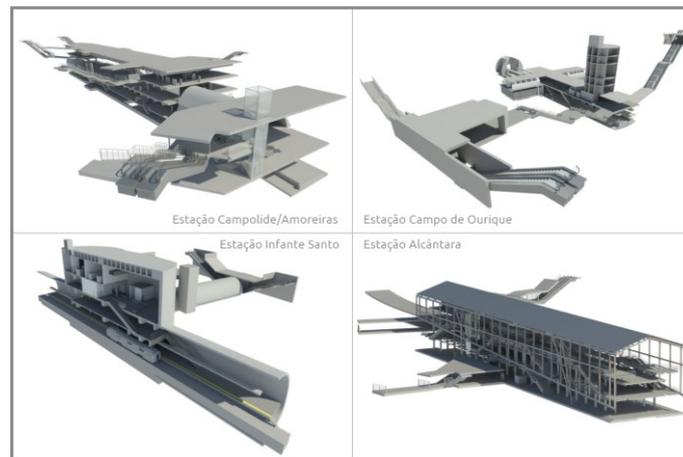


METRO DE LISBOA

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 PV211

NOTA DE CÁLCULO – ESTRUTURAS PROVISÓRIAS

Documento SAP:	LVSSA MSA PE STR PVE PV211 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
4.2	Suporte primário do túnel de ligação.....	8
4.2.1	Considerações gerais.....	8
4.2.2	Modelo de cálculo do túnel de ligação	8
4.2.3	Faseamento construtivo adotado no modelo numérico.....	8
5	CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA.....	12
5.1	Descrição geral.....	12
5.2	Estado limite último (ELU).....	13
5.2.1	Resistência à flexão de elementos	13
5.2.2	Resistência ao corte de elementos	13
5.2.3	Resistência à encurvadura por varejamento das escoras	14
5.2.4	Resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	14
5.2.5	Resistência ao esforço transverso/corte do revestimento em betão projetado	16
5.2.6	Resistência em flexão composta das cambotas.....	17
5.3	Estado limite de serviço (ELS).....	18
6	RESUMO DAS VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA.....	19
6.1	Estado Limite Último (ELU).....	19
6.1.1	Resistência em flexão composta do revestimento em betão projetado reforçado com fibras metálicas	19
6.1.2	Resistência ao esforço transverso/corte do revestimento em betão projetado	20
6.1.3	Resistência em flexão composta das cambotas.....	21
6.2	Estado Limite de Serviço (ELS).....	22

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 PV211**, 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 2D, 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. A modelação numérica foi efetuada considerando um modelo 2D axissimétrico. 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.

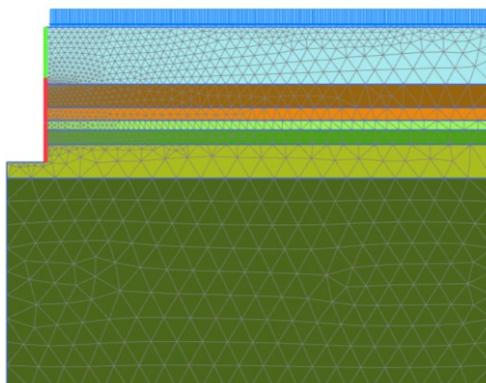


Figura 1 – Modelo de cálculo do poço de ventilação PV211.

4.2 Suporte primário do túnel de ligação

4.2.1 Considerações gerais

O dimensionamento do suporte primário do túnel de ligação, pela importância de considerar o faseamento construtivo para a estimativa de esforços e deformações, foi também realizado através do programa de cálculo automático Plaxis 2D, de forma análoga ao descrito em 4.1.

A sequência de construção foi simulada mediante a remoção, introdução de elementos e a alteração das suas propriedades.

A determinação do fator de descompressão que simula o avanço da frente de escavação, depende de numerosos fatores (modelos constitutivos dos materiais, estado de tensão inicial, rigidez do suporte, pré-suporte da frente, etc.) que apenas podem ser equacionados com precisão recorrendo a modelos tridimensionais, apenas desenvolvidos em fases avançadas de projeto, devido ao tempo necessário para os desenvolver e calibrar.

Não obstante, através de retroanálises realizadas em projetos de escavações em método mineiro, considerou-se que o fator de descompressão varia entre 40% a 80%, pelo que as análises realizadas neste Projeto de Execução em modelos numéricos bidimensionais contemplam 40%, 60% e 80% de descompressão.

4.2.2 Modelo de cálculo do túnel de ligação

Na modelação do suporte primário foram utilizados elementos estruturais com as propriedades de resistência, inércia e deformabilidade, representativas dos diversos elementos de suporte. 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 e as cambotas treliçadas a aplicar no contorno da escavação, foram modelados através de elementos *plate* com comportamento elástico-plástico perfeito, com as propriedades mecânicas representativas da sua resistência e deformabilidade com uma idade $\leq 1, 7$ e 28 dias, consoante o avanço das fases de escavação.

Na Figura 2 apresenta-se o modelo de cálculo bidimensional adotado.

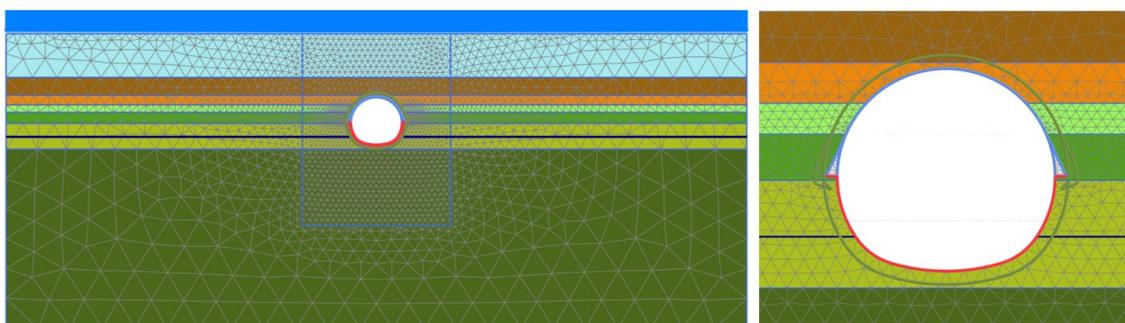


Figura 2 - Modelo de cálculo do túnel de ligação

4.2.3 Faseamento construtivo adotado no modelo numérico

A definição de etapas de cálculo para a modelação do faseamento construtivo, permite simular a variação de tensões a que o maciço se encontra sujeito durante o processo, permitindo extrair dos modelos as grandezas relevantes para o dimensionamento nos elementos estruturais que compõem o suporte primário. Foi realizada uma zeragem dos deslocamentos após a aplicação das sobrecargas, de modo que os deslocamentos decorrentes da sua aplicação não fossem somados aos deslocamentos resultantes da escavação.

Na Tabela 1 e Tabela 2 apresenta-se o faseamento construtivo adotado.

Tabela 1 - Faseamento construtivo modelado do túnel de ligação (1/3)

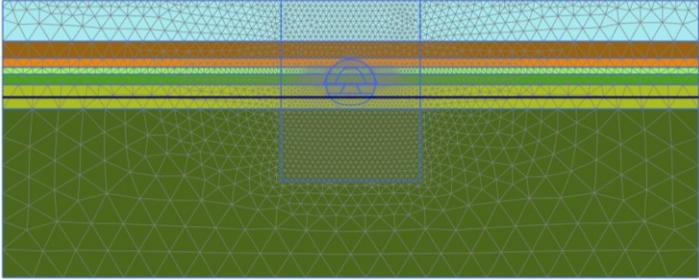
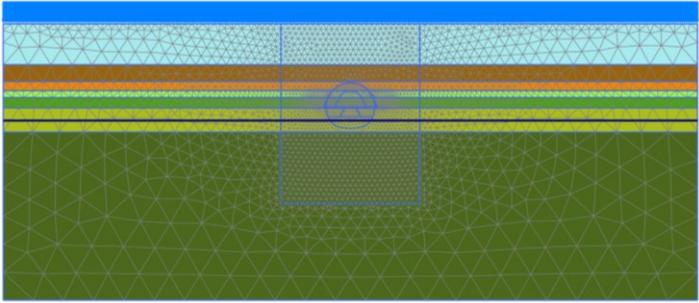
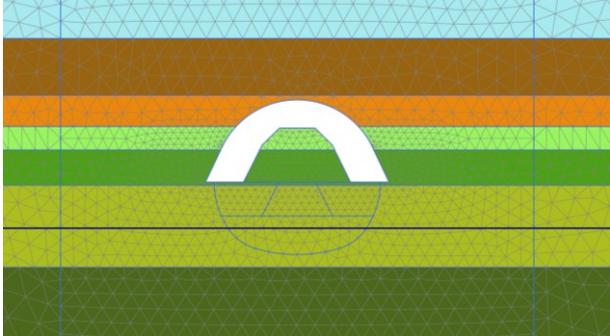
<p>Estado de tensão inicial</p>	
<p>Aplicação das sobrecargas de superfície</p>	
<p>Avanço da escavação das bancadas laterais da calote</p>	

Tabela 2 - Faseamento construtivo modelado do túnel de ligação (2/3)

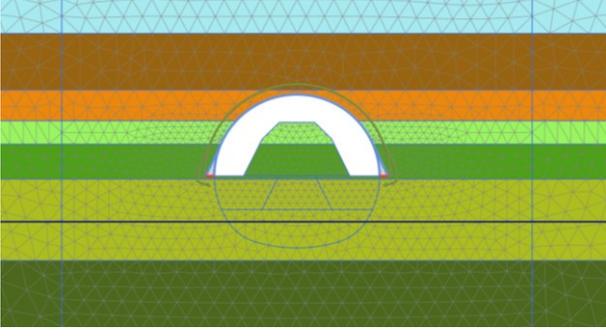
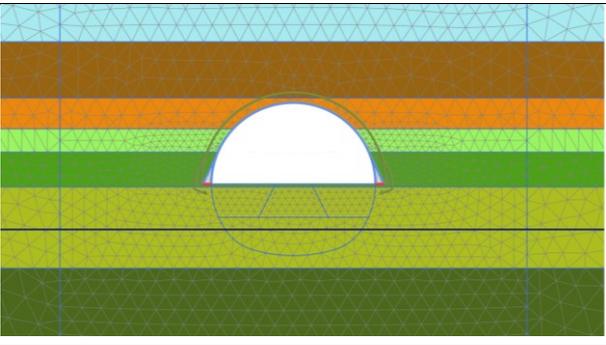
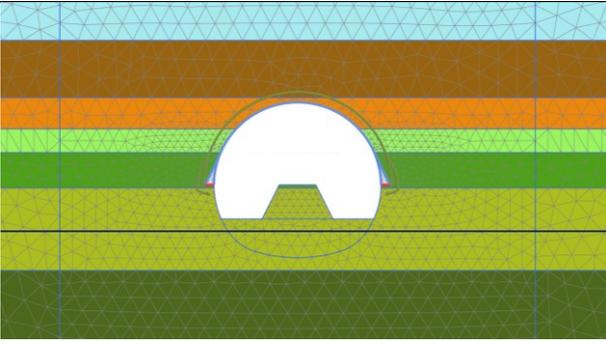
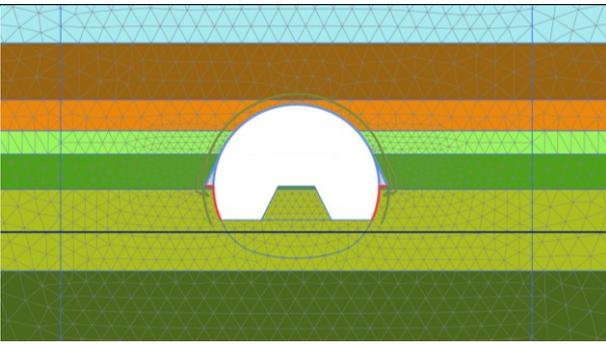
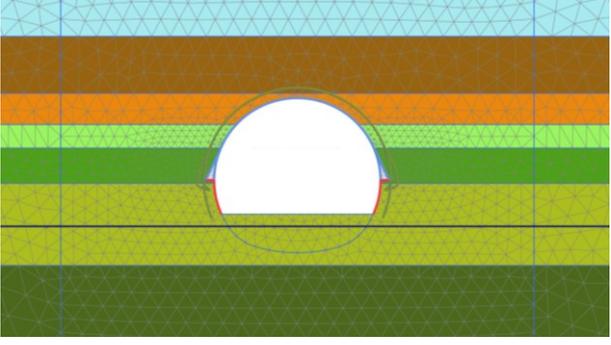
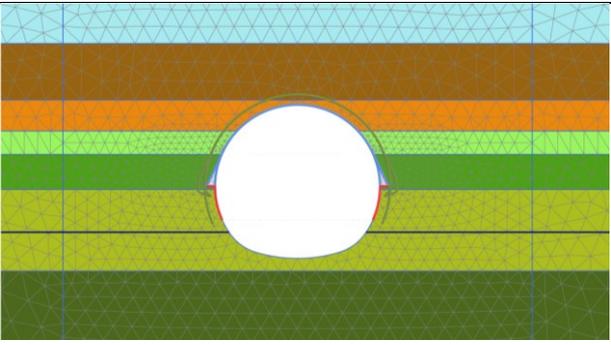
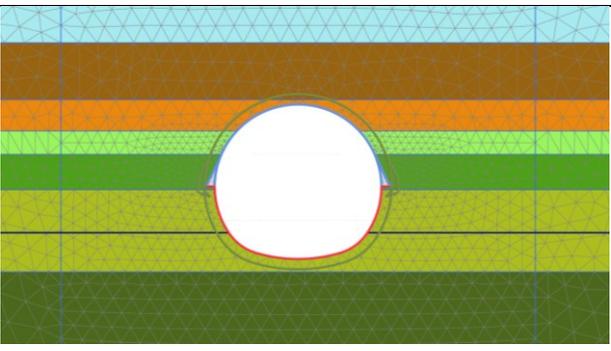
<p>Instalação do suporte primário na calote e escavação total das bancadas laterais da calote</p>	
<p>Avanço da escavação da bancada central da calote</p>	
<p>Avanço da escavação das bancadas laterais do 1º rebaixo</p>	
<p>Instalação do suporte primário das bancadas laterais do 1º rebaixo e escavação total das mesmas</p>	

Tabela 3 - Faseamento construtivo modelado do túnel de ligação (3/3)

<p>Avanço da escavação da bancada central do 1º rebaixo</p>	
<p>Avanço da escavação da soleira</p>	
<p>Instalação do suporte primário da soleira e escavação total da soleira</p>	

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 4.

Tabela 4 – 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 5 as verificações a efetuar para os diversos elementos.

Tabela 5 – 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 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.

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

Com referido no ponto 4.2 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):

$$\begin{aligned} \sigma_{1d} &= 1.0 \cdot f_{cm} \cdot \max \{1.6m - d; 1.0\} \cdot (\epsilon_{ctm} \text{ used}) \\ &= 0.5 \cdot \sigma_{2d} \quad (\epsilon_{ctm} \text{ not used}) \\ \sigma_{2d} &= \alpha_{sys} \cdot \alpha_{char} \cdot \kappa_h \cdot \alpha_{R1} \cdot f_{R1,m} / \gamma^f_{ct} \\ \sigma_{3d} &= \alpha_{sys} \cdot \alpha_{char} \cdot \kappa_h \cdot \alpha_{R3} \cdot f_{R3,m} / \gamma^f_{ct} \end{aligned}$$