
PROJECTO DE EXECUÇÃO

- Cálculos
 - Anexos
-

BENEFICIAÇÃO DE UM
TÚNEL FERROVIÁRIO

Lisboa, Setembro de 2011

PROJECTO DE EXECUÇÃO

MEMÓRIA DOS CÁLCULOS

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	1
1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	2
2. CAPÍTULO I.....	3
2.1. MODELO DE CÁLCULO	3
2.2. SECÇÃO 0+615M.....	8
2.2.1. ACCÇÕES ESTÁTICAS	8
2.2.2. ACCÇÕES DINÂMICAS	10
2.2.3. ESFORÇOS	11
2.2.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO	11
2.2.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	11
2.3. SECÇÃO 0+627M.....	13
2.3.1. ACCÇÕES DINÂMICAS	15
2.3.2. ESFORÇOS	15
2.3.3. VERIFICAÇÕES.....	16
2.3.3.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	16
2.4. SECÇÃO 0+668M.....	17
2.4.1. ACCÇÕES DINÂMICAS	20
2.4.2. ESFORÇOS	20
2.4.3. VERIFICAÇÕES.....	20
2.4.3.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	21
2.5. SECÇÃO 0+750M (BOCA DE SAÍDA).....	22
2.5.1. ACCÇÕES ESTÁTICAS	22
2.5.2. ACCÇÕES DINÂMICAS	27
2.5.3. ESFORÇOS	27
2.5.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO	28
2.5.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	28
3. CAPÍTULO 2	32
3.1. SECÇÃO 0+678M.....	33
3.1.1. ACCÇÕES ESTÁTICAS	33
3.1.2. ACCÇÕES DINÂMICAS	36
3.1.3. ESFORÇOS	36
3.1.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO	36
3.1.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	37
3.2. SECÇÃO 0+699M.....	42
3.2.1. ACCÇÕES ESTÁTICAS	42
3.2.2. ACCÇÕES DINÂMICAS	46
3.2.3. ESFORÇOS	47
3.2.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO	47
3.2.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	47
3.3. SECÇÃO 0+720M.....	52
3.3.1. ACCÇÕES ESTÁTICAS	52
3.3.2. ACCÇÕES DINÂMICAS	56
3.3.3. ESFORÇOS	57

3.3.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO	57
3.3.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES	57
4. CAPÍTULO 3	63
4.1. SISTEMA DE DRENAGEM LONGITUDINAL.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.....	12
Tabela 2 - Valores dos esforços e tensões para a Combinação Frequente.....	12
Tabela 3 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.....	16
Tabela 4 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.	17
Tabela 5 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.....	21
Tabela 6 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.	22
Tabela 7 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.....	28
Tabela 8 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.	29
Tabela 9 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.....	30
Tabela 10 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Frequente.....	30
Tabela 11 - Designação das Combinações para as sobrecargas.....	33
Tabela 12 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.	37
Tabela 13 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.	38
Tabela 14 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Frequente.	38
Tabela 15 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Frequente.	39
Tabela 16 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.	40
Tabela 17 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.	40
Tabela 18 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Frequente.	41
Tabela 19 - - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Frequente.	41
Tabela 20 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.....	48
Tabela 21 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga do hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.	48
Tabela 22 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Frequente.	49
Tabela 23 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga do hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Frequente.....	49
Tabela 24 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.	50
Tabela 25 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.	50
Tabela 26 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.	51
Tabela 27 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.	51
Tabela 28 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.	58
Tabela 29 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.	58
Tabela 30 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.....	59
Tabela 31 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga hotel para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.....	59
Tabela 32 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.....	60
Tabela 33 - Valores dos esforços e tensões com influenciada sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.....	61
Tabela 34 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.	61
Tabela 35 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Frequente.	62

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Estáticas.	4
Ilustração 2 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Dinâmicas.	4
Ilustração 3 - Esquema da determinação da acção vertical.	5
Ilustração 4 - Definição da Carga Horizontal.	6
Ilustração 5 - Representação dos ângulos nos arcos superior e inferior.	6
Ilustração 6 - Representação da Secção 0+615m.	8
Ilustração 7 - Numeração das Barras do modelo da Secção 0+615m.	11
Ilustração 8 - Representação da Secção 0+627m.	13
Ilustração 9 - Numeração das barras do modelo da Secção 0+627m.	16
Ilustração 10 - Representação da Secção 0+668m.	17
Ilustração 11 - Numeração das barras do modelo da Secção 0+668m.	21
Ilustração 12 - Representação da Secção 0+750m.	23
Ilustração 13 - Esquema de cálculo da Boca de Saída, para análise dinâmica.	27
Ilustração 14 - Numeração das barras do arco menor da Boca de Saída.	28
Ilustração 15 - Numeração das barras do arco central da Boca de Saída.	30
Ilustração 16 - Localização dos cortes transversais e da localização do Hotel Batalha.	32
Ilustração 17 - Representação da Secção 0+678m.	33
Ilustração 18 - Numeração das barras do arco Ascendente e Central Ascendente.	37
Ilustração 19 - Representação da Secção 0+699m.	42
Ilustração 20 - Numeração das barras do arco Ascendente e Central Ascendente.	47
Ilustração 21 - Numeração das barras do arco da Galeria Central.	57
Ilustração 22 - Numeração das barras do arco da Galeria Ascendente.	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Características geomecânicas do maciço envolvente do túnel.	2
Quadro 2 - Características geomecânicas do revestimento do túnel.	2
Quadro 3 - Coeficientes correspondente às acções variáveis.	8
Quadro 4 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para as acções.	8
Quadro 5 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para os parâmetros do terreno.	8

INTRODUÇÃO

Os cálculos que se apresentam referem-se ao projecto de execução de um túnel ferroviário. Trata-se de um túnel extenso sensivelmente 750m de comprimento e contendo várias galerias, possuindo as anomalias típicas de túneis, praticamente ao longo de toda a sua extensão.

O túnel em questão necessita efectivamente beneficiação, porém com maior expressão na vertente estrutural.

Para a verificação da segurança da capacidade resistente do revestimento do túnel, dividiu-se este estudo em dois capítulos, em que o primeiro capítulo consiste na verificação de várias secções transversais ao longo Túnel e o segundo capítulo no estudo de três secções transversais que se localizam por baixo das instalações do Hotel Batalha de forma a saber a influência quer na distribuição de tensões ao longo no maciço, quer na estabilidade estrutural do túnel.

O sistema de drenagem foi dimensionado para que seja garantida a boa funcionalidade deste órgão a fim de evitar que as águas captadas pelos drenos não evadam a plataforma da via, como se verificou nas inspecções realizadas.

Para os órgãos de segurança para pessoas, nichos e câmaras de serviço, demonstra-se todo o processo e método de utilizado para o seu dimensionamento, respeitando as normas em vigor.

1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

As características atribuídas ao revestimento e ao maciço foram baseadas nos resultados dos relatórios do LNEC e dos Trabalhos de Campo.

Dentro do relatório do LNEC destaca-se um quadro (Quadro 1), referente às características geomecânicas do maciço do túnel.

Zona	W	F	RQD (%)	σ_c (MPa)	E (GPa)	I_r (MPa)	V_1 (m/s)	RMR	Q	γ (kN/m ³)
ZG1	W ₂₋₃	F ₃	>75	75	19,5	5	5000	58	13,2	27
ZG2	W ₃	F ₃₋₄	50-75	17	1,7	0,3	2900	33	3,6	25
ZG3	W ₄₋₅	F ₄₋₅	<50	9	0,65	0,2	2700	20	0,08	23

Quadro 1 - Características geomecânicas do maciço envolvente do túnel.

W – Estado de alteração do maciço identificado de acordo com a classificação da ISRM.

F – Estado de fracturação do maciço rochoso de acordo com a classificação da ISRM.

RQD – Índice que varia de 0 a 100 e que traduz o grau de fracturação do maciço.

σ_c – Resistência à compressão uniaxial da rocha.

E – Módulo de Elasticidade obtido em provetes de rocha.

I_r – Índice de resistência *point-load*.

V_1 – Velocidade de propagação de ultra-sons.

RMR – Índice *Rock Mass Ratio* utilizado pela classificação de Bieniawski (1984).

Q – Índice utilizado pela classificação de Barton (Barton et al., 1993).

γ - Peso Volúmico do maciço.

Foram também recolhidas amostras do revestimento, que posteriormente sofreram ensaios de compressão simples em laboratório. Estes resultados estão incluídos no Relatório de Trabalhos de Campo (Quadro 2).

Provete N°	PL	PM	Amostra N°	Prof. (m)	COMPRESSÃO SIMPLES		
					Secção (mm ²)	Força F (kN)	Tensão de Rotura Qu (Mpa)
1	1	388	1.1-REV	Revestimento 0,60	3,739	15,9	58,0
3	4	444	2.2-REV	Revestimento 0,55	3,739	40,8	11,0
4	4	368	3.1-REV	Revestimento 0,60	3,739	47,2	12,5
6	5	281	4.1-REV	Revestimento 0,60	3,739	250,7	67,0
8	2	455	6.1-REV	Revestimento 0,50	3,739	71,9	19,5

Quadro 2 - Características geomecânicas do revestimento do túnel.

No entanto, devido ao reduzido número de amostras recolhidas do revestimento, não podemos considerar estes valores como um todo absoluto.

2. CAPÍTULO I

2.1. MODELO DE CÁLCULO

No estudo foram modeladas sete secções transversais do túnel. A escolha para estas secções baseia-se na situação mais desfavorável, o que quer dizer que estão sujeitas a maiores esforços e deformações.

As secções situam-se nos seguintes pontos quilométricos:

- Secção P.k. 0+615m;
- Secção P.k. 0+627m;
- Secção P.k. 0+668m;
- Secção P.k. 0+678m;
- Secção P.k. 0+699m;
- Secção P.k. 0+720m;
- Secção P.k. 0+750m.

O modelo de cálculo adoptado considera o revestimento (abóbada e hasteais) em blocos de alvenaria de granito e o terreno do maciço encaixante granítico.

Elaboraram-se dois modelos de cálculo em cada uma das secções, um modelo para as acções estáticas (Ilustração 1) e outro para as dinâmicas (Ilustração 2).

Estes modelos distinguem-se pela área de terreno do maciço encaixante. Para o modelo utilizado no cálculo das acções estáticas considerou-se encastramentos na base dos hasteais e nas acções dinâmicas considera-se molas simulando a continuidade do terreno envolvente do túnel.

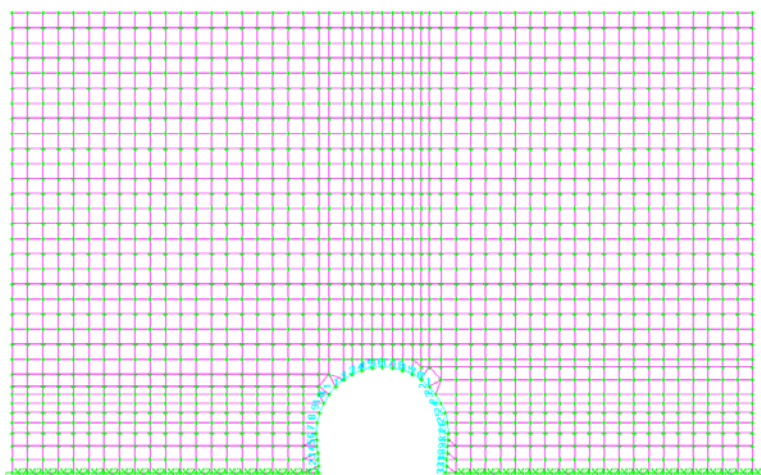


Ilustração 1 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Estáticas.

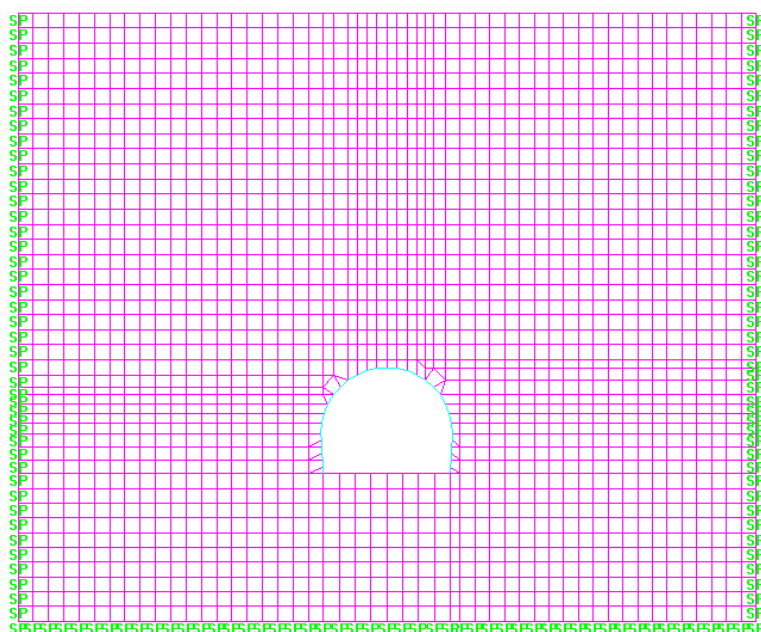


Ilustração 2 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Dinâmicas.

Os modelos referidos foram elaborados no programa de cálculo automático STRAP v 12.5, onde o revestimento do túnel foi modelado através de elementos lineares, barras, e o maciço encaixante (terreno envolvente) através de elementos finitos.

Determinação das acções actuantes

Acção Vertical

Para determinar a carga vertical, considerou-se uma altura máxima de terreno a actuar sobre a abóbada, relacionada com a largura (B) e a altura (H) da secção do túnel (Ilustração 3).

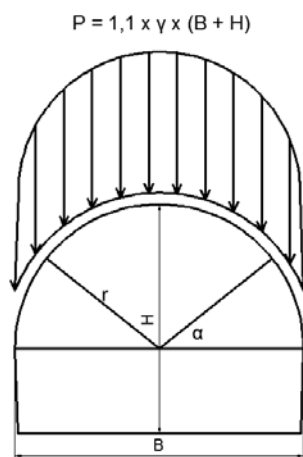


Ilustração 3 - Esquema da determinação da acção vertical.

Acção Horizontal

Para determinar a carga horizontal, considerou-se o seu valor máximo na zona de maior largura da secção do perfil, valor este que é proporcional ao deslocamento horizontal sofrido e à correspondente reacção do maciço rochoso.

A reacção do terreno, sobre os hasteais do revestimento do túnel, foi determinada considerando o seu valor máximo na zona de maior largura da secção do perfil, valor este, que é proporcional ao deslocamento sofrido, segundo a horizontal, e à correspondente reacção do maciço rochoso.

A distribuição das reacções do terreno sobre o revestimento, com a direcção perpendicular ao eixo da sua secção média, foi considerada com os seguintes parâmetros:

1. Existem dois pontos em que o valor da reacção é nulo, e que se situam respectivamente na secção de arranque do revestimento e a quartos da abóbada superior;
2. O valor máximo da reacção lateral q , que como se disse localiza-se na zona de maior largura, será proporcional ao respectivo deslocamento na horizontal, sofrido sob a acção das cargas.

Para melhor esclarecimento representa-se a Ilustração 4, com as duas alíneas acima referenciadas.

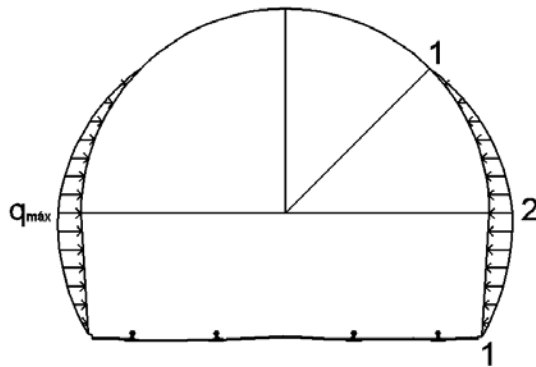


Ilustração 4 - Definição da Carga Horizontal.

Para efeitos de distribuição das cargas radiais em cada nó, consideram-se as seguintes leis de variação contínua que, para uma reacção máxima igual à unidade, têm a seguinte expressão:

Arco Superior

$$q_n = 1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$$

Arco Inferior

$$q_n = 1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$$

tendo α_n , α_0 , β_n e β_0 o seguinte significado:

α_n – ângulo formado pela radial do nó, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

α_0 - ângulo formado pela radial do ponto de acção nula, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

β_n – ângulo formado pela radial do nó, com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

β_0 – ângulo formado pela radial do nó de encastramento com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

Neste caso tem-se:

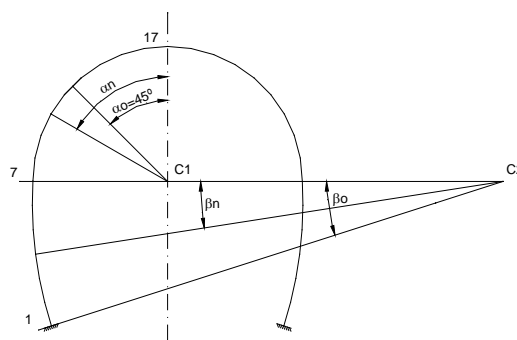


Ilustração 5 – Representação dos ângulos nos arcos superior e inferior.

Conhecidos os deslocamentos horizontais, nó que corresponde à largura máxima da secção para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- $\delta_{h_{p=1}}$ (m) – Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
- δ_{h_p} (m) – Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

E por fim, admitindo um coeficiente de reacção (C (Gpa)), através da seguinte relação indica qual a carga máxima horizontal existente e então tem-se:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Acção Sobrecarga

As sobrecargas correspondem às acções exercidas pelos edifícios existentes à superfície. Estas cargas são consideradas para avaliar a sua influência no comportamento global do maciço e do túnel. Segundo o RSAEP, define para a zona de implantação dos edifícios, uma carga permanente característica por piso (G_k) de 8 kN/m^2 e uma sobrecarga de utilização por piso no valor de $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Combinações de acções

Os valores de cálculo dos esforços actuantes para a verificação da segurança, devem ser obtidos considerando as regras de combinação. Portanto as combinações utilizadas para esta verificação foram:

- Combinação Estado Limite Último:

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} S_{Gik} + \gamma_q \left[S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} S_{Qjk} \right]$$

- Combinação Freqüente:

$$S_d = \sum_{i=1}^m S_{Gik} + \left[\psi_1 S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} S_{Qjk} \right]$$

Os valores característicos das acções (Ψ) a considerar para as combinações frequentes são, conforme o quadro (Quadro 3):

Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
0,4	0,3	0,2

Quadro 3 - Coeficientes correspondente às acções varáveis.

De seguida mostra-se o quadro (Quadro4 – referente ao Anexo A, Quadro 3, do Eurocódigo 7), que indica quais os valores dos coeficientes parciais de segurança das acções, para cada combinação:

Acção		Símbolo	Conjunto	
			A1	A2
Permanente	Desfavorável	γ_G	1,35	1,0
	Favorável		1,0	1,0
Variável	Desfavorável	γ_Q	1,5	1,3
	Favorável		0	0

Quadro 4 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para as acções.

De seguida mostra-se outro quadro, Quadro 4, que para a verificação dos estados limites em causa, os coeficientes parciais para os parâmetros do terreno abrangem os seguintes valores:

Parâmetro do terreno	Símbolo	Conjunto	
		M1	M2
Ângulo de atrito interno em tensões efectivas ^{a)}	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesão em tensões efectivas	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistência ao corte não drenada	γ_{cu}	1,0	1,4
Resistência à compressão uniaxial	γ_{qu}	1,0	1,4
Peso Volúmico	γ_γ	1,0	1,0
Este coeficiente é aplicado a tg ϕ			

Quadro 5 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para os parâmetros do terreno.

2.2. SECÇÃO 0+615M

2.2.1. ACÇÕES ESTÁTICAS

Accão Vertical

As secção 0+615m é constituída por uma galeria, como mostra a Ilustração 6.

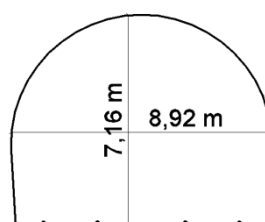


Ilustração 6 - Representação da Secção 0+615m.

Esta secção encontra-se na parte do maciço com melhor classificação, nomeadamente ZG1, portanto:

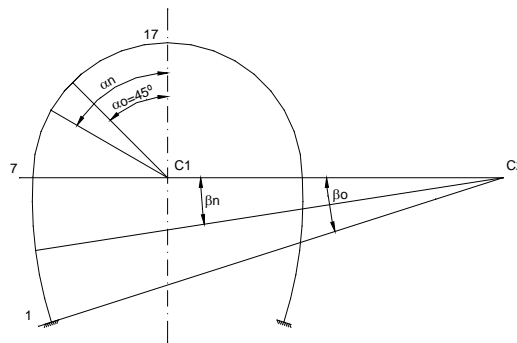
- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 8,92\text{m}$;
- $H = 7,16\text{m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$;
- Recobrimento = 14m.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 25 \times (8,92 + 7,16) = 442,2 \text{ kN/m.}$$

Accção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,93^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,93°	3,93°	0,0000
2	2,80°	3,93°	0,4920
3	2,21°	3,93°	0,6834
4	1,63°	3,93°	0,8278
5	1,04°	3,93°	0,9299
6	0,45°	3,93°	0,9869
7	0,00°	3,93°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$
----	------------	------------	---

7	90,00°	45,00°	1,0000
8	81,00°	45,00°	0,9511
9	72,00°	45,00°	0,8090
10	63,00°	45,00°	0,5878
11	54,00°	45,00°	0,3090
12	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 7, (nó que corresponde à largura máxima da secção) pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 61,16 \times 10^{-6} \text{ m}$$

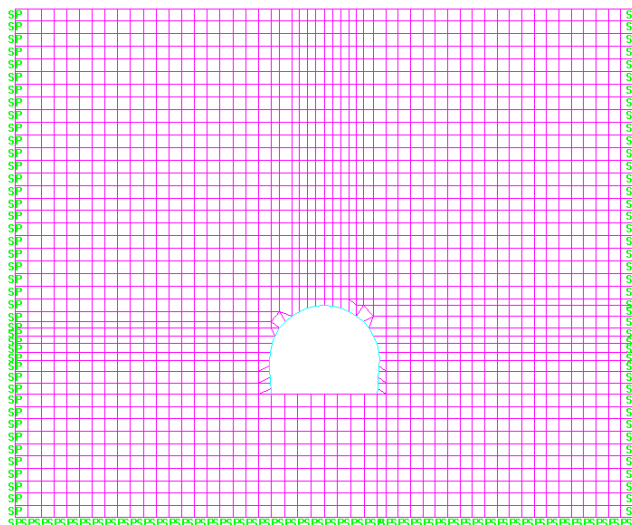
- Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 3,01 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_p=1}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{61,16 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 3,01 \times 10^{-7}} = 173,61 \text{ kN/m}^2$$

2.2.2. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

2.2.3. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

2.2.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

2.2.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

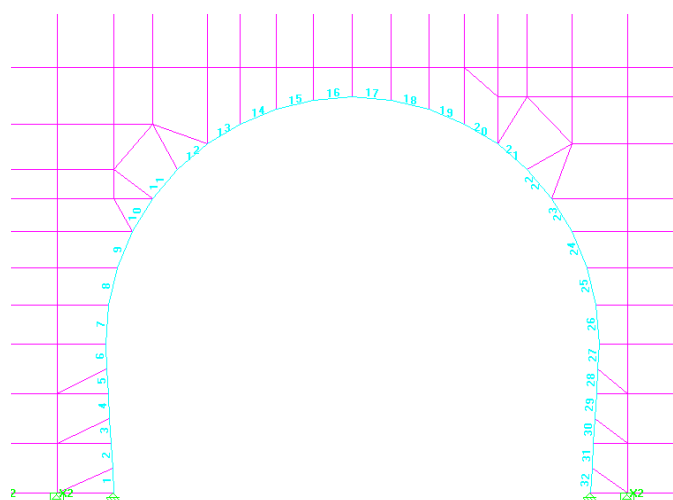


Ilustração 7 - Numeração das Barras do modelo da Secção 0+615m.

De seguida representam-se duas tabelas com os valores para as Combinações Estado Limite Último, Tabela 1, e uma tabela com os valores da Combinação Freqüente, Tabela 2, em que estão representados os esforços e tensões actuantes na secção do túnel.

Tabela 1 - Valores dos esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.

COMBINAÇÃO ELU					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-340	14,2	-803,33	-330,00
	2	-330	-0,5	-541,67	-558,33
Barra 7	1	-545	-12	-708,33	-1108,33
	2	-519,5	0,1	-867,50	-864,17
	3	-494	-16,5	-548,33	-1098,33
Barra 12	1	-357	-17	-311,67	-878,33
	2	-240,5	6,6	-510,83	-290,83
	3	-124	-17,8	90,00	-503,33
Barra 16	1	72	-19	436,67	-196,67
	2	90,5	21,5	-207,50	1511,67
	3	109	-19,1	500,00	-136,67

Tabela 2 - Valores dos esforços e tensões para a Combinação Frequente.

COMBINAÇÃO FREQUENTE					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-230	5	-466,67	-300,00
	2	-223	-1,3	-350,00	-393,33
Barra 7	1	-369	-8	-481,67	-748,33
	2	-350	1,1	-601,67	-565,00
	3	-331	11,1	-736,67	-366,67
Barra 12	1	-253	-12,4	-215,00	-628,33
	2	-166,5	4,9	-359,17	-195,83
	3	-80	-13,3	88,33	-355,00
Barra 16	1	45,6	-14,5	317,67	-165,67
	2	59,1	15,4	-158,17	355,17
	3	72,6	-14,6	364,33	-122,33

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = $33,6 \times 10^3$ kPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4 \times 10^3$ kPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção quer para ambas as combinações estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura, garantido assim a segurança.

2.3. SECÇÃO 0+627M

Acção Vertical

As secção 0+627m é constituída por uma galeria, como mostra a Ilustração 2.

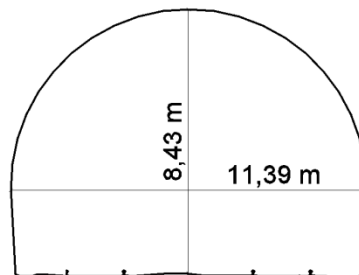


Ilustração 8 - Representação da Secção 0+627m.

Esta secção situa-se na parte do maciço com melhor classificação, nomeadamente ZG1, portanto:

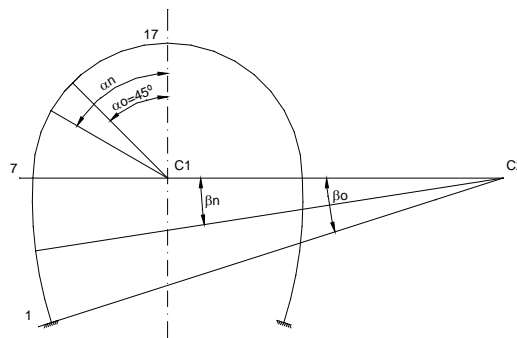
- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 11,39 \text{ m}$;
- $H = 8,43 \text{ m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$;
- Recobrimento = 14m.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 27 \times (11,39 + 8,43) = 588,7 \text{ kN/m.}$$

Acção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,02^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,02°	3,02°	0,0000
2	2,47°	3,02°	0,3309
3	1,93°	3,02°	0,5914
4	1,38°	3,02°	0,7910
5	0,84°	3,02°	0,9226
6	0,29°	3,02°	0,9908
7	0,00°	3,02°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$
7	90,00°	45,00°	1,0000
8	81,82°	45,00°	0,9595
9	73,64°	45,00°	0,8413
10	65,45°	45,00°	0,6547
11	57,27°	45,00°	0,4153
12	49,09°	45,00°	0,1423
13	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 7, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 179,37 \times 10^{-6} \text{ m}$$

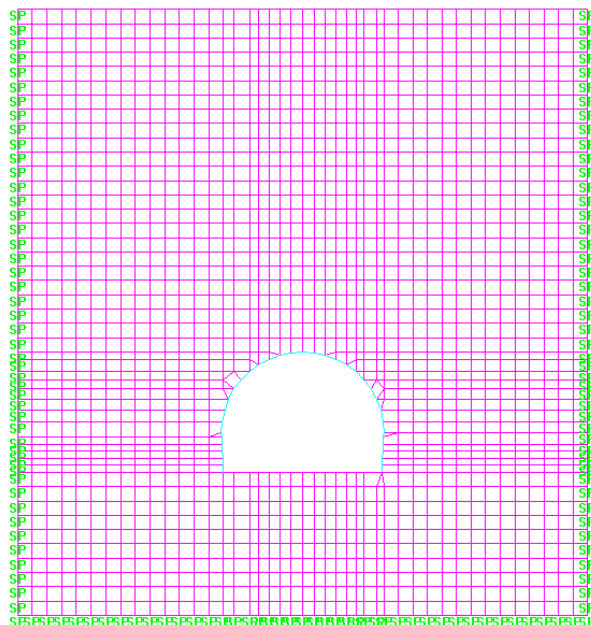
- Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 4,60 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_p=1}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{109,73 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 3,97 \times 10^{-7}} = 244,79 \text{ kN/m}^2$$

2.3.1. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

2.3.2. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

2.3.3. VERIFICAÇÕES

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

2.3.3.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

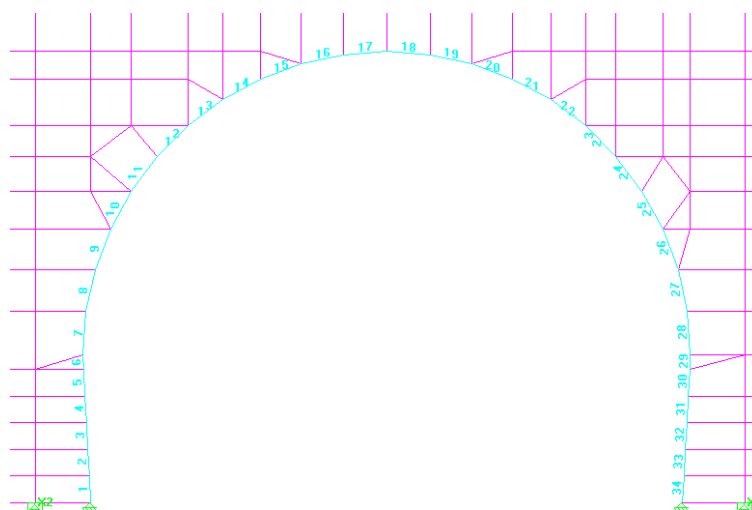


Ilustração 9 - Numeração das barras do modelo da Secção 0+627m.

De seguida representam-se duas tabelas, Tabela 3 e 4, com os esforços e tensões actuantes na secção do túnel:

Tabela 3 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.

COMBINAÇÃO ELU					
		Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
Nós		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-466	24,7	-1188,33	-365,00
	2	-455	-6,8	-645,00	-871,67
Barra 7	1	-741	-15,5	-976,67	-1493,33
	2	-677	7,5	-1253,33	-1003,33
	3	-677	-24,3	221,67	-1533,33
Barra 12	1	-575	-25,6	-105,00	-425,00
	2	-407	9	-828,33	-528,33
	3	-239	-28,5	-398,33	-873,33
Barra 17	1	96,6	-37	161,00	-455,67
	2	120,3	30	-299,50	700,50
	3	144	-37,2	240,00	-380,00

Tabela 4 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.

COMBINAÇÃO FREQUENTE						
		Esforços		Tensão Actuante (kPa)		
		Nós	N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-326	13,6	-770,00	-316,67	
	2	-318	-4,7	-451,67	-608,33	
Barra 7	1	-511	-11,1	-666,67	-1036,67	
	2	-487,5	6	-912,50	-712,50	
	3	-464	-17,5	-481,67	-1065,00	
Barra 12	1	-410	-18,9	-368,33	-998,33	
	2	-285,5	6,7	-587,50	-364,17	
	3	-161	-21,1	83,33	-620,00	
Barra 16	1	62,2	-26,2	540,33	-333,00	
	2	79,9	20,7	-211,83	478,17	
	3	97,6	-27,8	626,00	-300,67	

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = $33,6 \times 10^3$ kPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4 \times 10^3$ kPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura para ambas as combinações, garantido assim a segurança.

2.4. SECÇÃO 0+668M

Accão Vertical

A constituição da secção 0+668 m difere das anteriores, o túnel bifurca para duas galerias, uma galeria no sentido ascendente e outra no sentido descendente, Ilustração

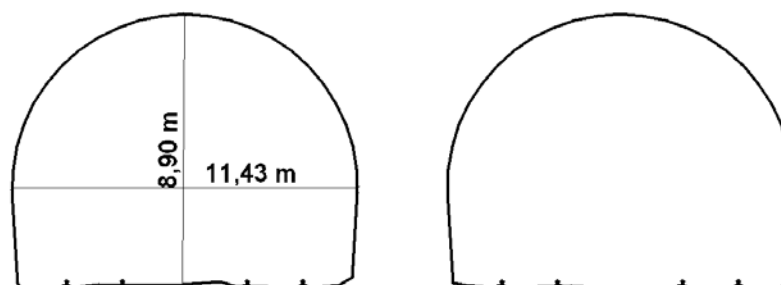


Ilustração 10 - Representação da Secção 0+668m.

Esta secção também localiza-se na parte do maciço com melhor classificação, nomeadamente ZG1, portanto:

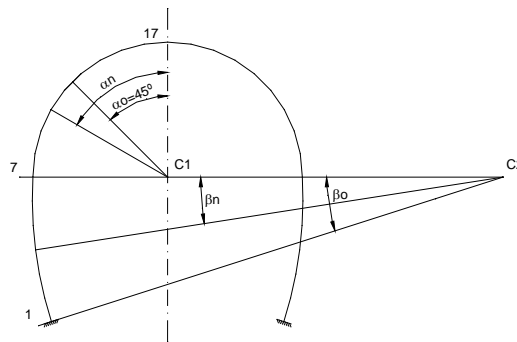
- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 11,43 \text{ m}$;
- $H = 8,90 \text{ m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$;
- Recobrimento = 14 m.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 27 \times (11,43 + 8,90) = 603,80 \text{ kN/m.}$$

Acção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,54^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,54°	3,54°	0,0000
2	2,95°	3,54°	0,3053
3	2,35°	3,54°	0,5590
4	1,77°	3,54°	0,7498
5	1,17°	3,54°	0,8906
6	0,57°	3,54°	0,9740
7	0,00°	3,54°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\text{sen}^2 \beta_n}{\text{sen}^2 \beta_0}$
7	90,00°	45,00°	1,0000
8	81,82°	45,00°	0,9595
9	73,64°	45,00°	0,8413
10	65,45°	45,00°	0,6547
11	57,27°	45,00°	0,4153
12	49,09°	45,00°	0,1423
13	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 7 e no nó 29, (nós que correspondem à largura máxima da secção) e que neste caso são distintos, para ambas as acções, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- Hasteal Esquerdo
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
$$\delta_h = 179,347 \times 10^{-6} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
$$\delta_{hq} = 4,60 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

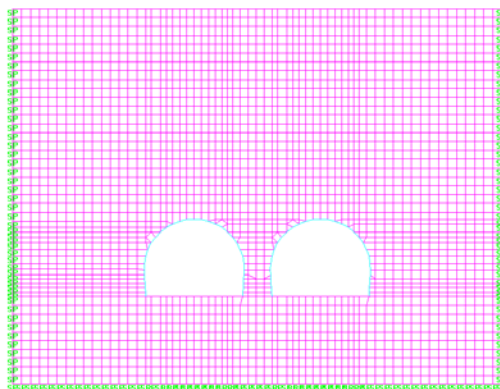
$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{179,37 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 4,60 \times 10^{-7}} = 350,81 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
$$\delta_h = 10,64 \times 10^{-6} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
$$\delta_{hq} = 7,7 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{10,64 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 7,7 \times 10^{-8}} = 82,90 \text{ kN/m}^2$$

2.4.1. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

2.4.2. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

2.4.3. VERIFICAÇÕES

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

2.4.3.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

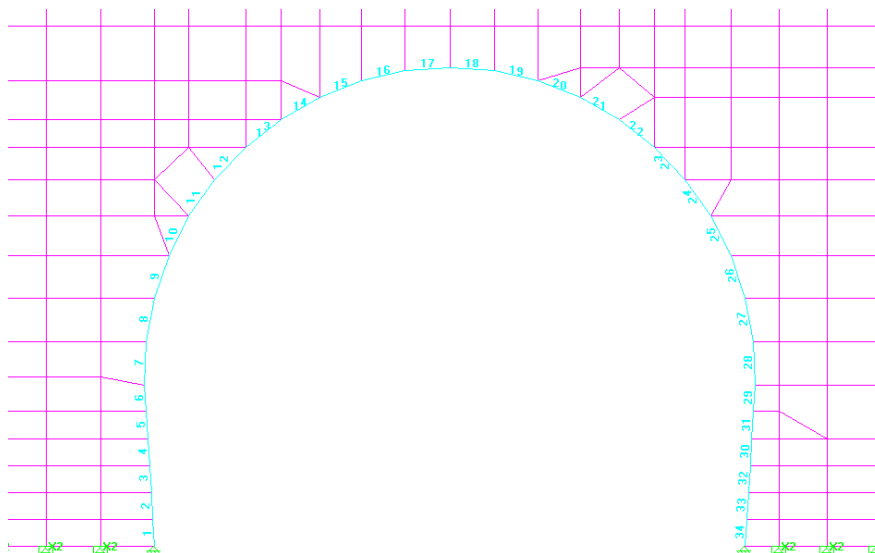


Ilustração 11 - Numeração das barras do modelo da Secção 0+668m.

Assim sendo mostram-se duas tabelas, Tabela 6 e 7, com os esforços e tensões actuantes na secção do túnel,

Tabela 5 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.

COMBINAÇÃO ELU					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-551	33,1	-1470,00	-366,67
	2	-540	-9,5	-741,67	-1058,33
Barra 6	1	-779	-6	-965,00	-1398,33
	2	-774	1,1	-1308,33	-1271,67
	3	-769	-20	-1261,67	-1615,00
Barra 12	1	-790	-30,6	-296,67	-1826,67
	2	-610,5	6,7	-1129,17	-905,83
	3	-431	-33,7	-718,33	-1280,00
Barra 17	1	79	-40,3	131,67	-540,00
	2	104	33	-376,67	723,33
	3	129	-40,4	215,00	-458,33
Barra 34	1	-1038	5,7	-1825,00	-1635,00
	2	-1049	-32,7	-1748,33	-2293,33
Barra 29	1	-1119	-10,6	-1865,00	-2041,67
	2	-1129	2,1	-1916,67	-1846,67
Barra 23	1	-346	-26,4	-576,67	-1016,67
	2	-540,5	11,1	-1085,83	-715,83
	3	-735	-24,6	-1225,00	-1635,00
Barra 18	1	-156	-40,4	-260,00	-933,33
	2	-131	33,5	-776,67	340,00
	3	-106	-39,4	-176,67	-833,33

Tabela 6 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.

COMBINAÇÃO FREQUENTE					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-393	17,1	-940,00	-370,00
	2	-385	-6,4	-535,00	-748,33
Barra 7	1	-627	-15	-795,00	-1295,00
	2	-603	9,8	-1168,33	-841,67
	3	-579	-23,6	-571,67	-1358,33
Barra 12	1	-563	-22,6	-561,67	-1315,00
	2	-430	5	-800,00	-633,33
	3	-297	-24,9	-80,00	-910,00
Barra 17	1	50,4	-30,3	589,00	-421,00
	2	68,9	24	-285,17	514,83
	3	87,4	-30,3	650,67	-359,33
Barra 34	1	-726	3,9	-1275,00	-1145,00
	2	-734	-23	-840,00	-1606,67
Barra 29	1	-782	-7,6	-1176,67	-1430,00
	3	-789	1,43	-1338,83	-1291,17
Barra 23	1	-233	-19,6	-61,67	-715,00
	2	-366,5	8,2	-747,50	-474,17
	3	-500	-18,1	-531,67	-1135,00
Barra 18	1	107	-30,3	683,33	-326,67
	2	88,35	24,4	-259,42	553,92
	3	69,7	-29,6	609,50	-377,17

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = 33,6 MPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4$ MPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura para ambas as combinações, garantido assim a segurança.

2.5. SECÇÃO 0+750M (BOCA DE SAÍDA)

2.5.1. ACÇÕES ESTÁTICAS

Acção Vertical

A Boca de Saída é constituída por um arco central de grande comprimento e por duas galerias mais pequenas, galerias descendente e ascendente. (Ilustração 12).

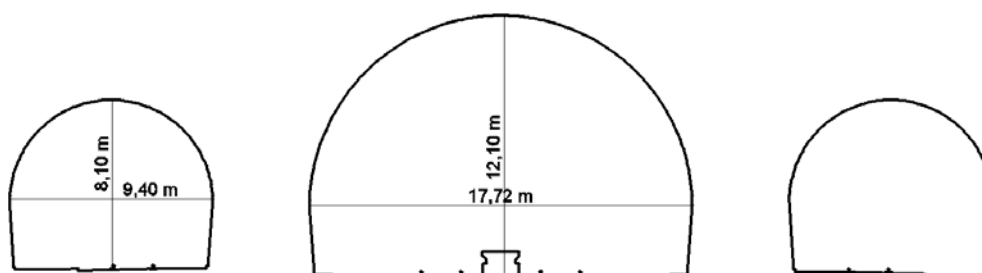


Ilustração 12 - Representação da Secção 0+750m.

Segundo o relatório do LNEC esta secção encontra-se na parte do maciço com pior classificação, nomeadamente ZG3, considerado uma rocha muito alterada a decomposta, ou seja maciço apresenta-se completamente friável, praticamente com comportamento de solo, portanto:

- Galeria Central
 - $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$;
 - $B = 17,71 \text{ m}$;
 - $H = 6,00 \text{ m}$;
 - $E = 0,65 \text{ GPa}$;
 - Recobrimento = 6,00 m.

Portanto o valor da acção vertical na galeria central é:

$$P = 1,10 \times 23 \times (17,71 + 6,00) = 599,86 \text{ kN/m.}$$

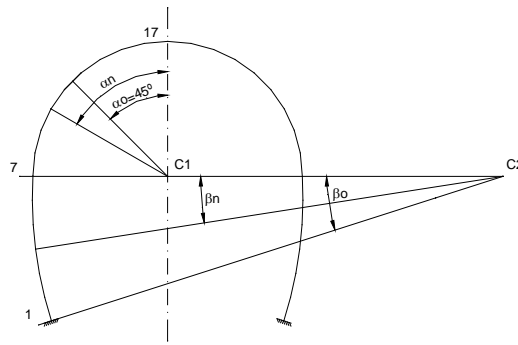
- Galerias Ascendente e Descendente:
 - $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$;
 - $B = 9,40 \text{ m}$;
 - $H = 8,10 \text{ m}$;
 - $E = 0,65 \text{ GPa}$;
 - Recobrimento = 9,90 m.

Portanto o valor da acção vertical na galeria central é:

$$P = 1,10 \times 23 \times (9,40 + 8,10) = 442,75 \text{ kN/m.}$$

Accção Horizontal

No caso da Galeria Central tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 4,20^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	4,20°	4,20°	0,0000
2	3,55°	4,20°	0,2853
3	2,91°	4,20°	0,5195
4	2,26°	4,20°	0,7101
5	1,61°	4,20°	0,8528
6	0,97°	4,20°	0,9466
7	0,32°	4,20°	0,9942
8	0,00	4,20°	0,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$
8	90,00°	45,00°	1,0000
9	83,33°	45,00°	0,9730
10	76,67°	45,00°	0,8937
11	70,00°	45,00°	0,7660
12	63,33°	45,00°	0,5971
13	56,67°	45,00°	0,3962
14	50,00°	45,00°	0,1736
15	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 8, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de

compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 33,45 \times 10^{-4} \text{ m}$$

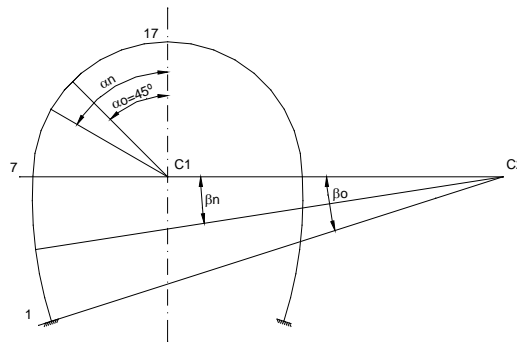
- Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 4,57 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 0,65 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_p=1}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{33,45 \times 10^{-4}}{\frac{1}{0,65 \times 10^6} + 4,57 \times 10^{-6}} = 548,23 \text{ kN/m}^2$$

No caso da Galeria Ascendente e Descendente tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,93^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,93°	3,93°	0,0000
2	3,35°	3,93°	0,2731
3	2,77°	3,93°	0,5028
4	2,19°	3,93°	0,6891
5	1,63°	3,93°	0,8278
6	1,03°	3,93°	0,9312
7	0,46°	3,93°	0,9863
8	0,00	3,93°	0,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\text{sen}^2 \beta_n}{\text{sen}^2 \beta_0}$
8	90,00°	45,00°	1,0000
9	81,00°	45,00°	0,9511
10	72,00°	45,00°	0,8090
11	63,00°	45,00°	0,5878
12	54,00°	45,00°	0,3090
13	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 8 e 28, (nós que correspondem à largura máxima da secção) e que neste caso são distintos no hasteal esquerdo e direito, para ambas as acções, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- Hasteal Esquerdo:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 18,70 \times 10^{-4} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 5,21 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 0,65 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_p=1}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{18,70 \times 10^{-4}}{\frac{1}{0,65 \times 10^6} + 5,21 \times 10^{-6}} = 276,70 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 13,42 \times 10^{-4} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 7,34 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 0,65 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_p=1}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{13,42 \times 10^{-4}}{\frac{1}{0,65 \times 10^6} + 7,34 \times 10^{-7}} = 590,55 \text{ kN/m}^2$$

2.5.2. ACÇÕES DINÂMICAS

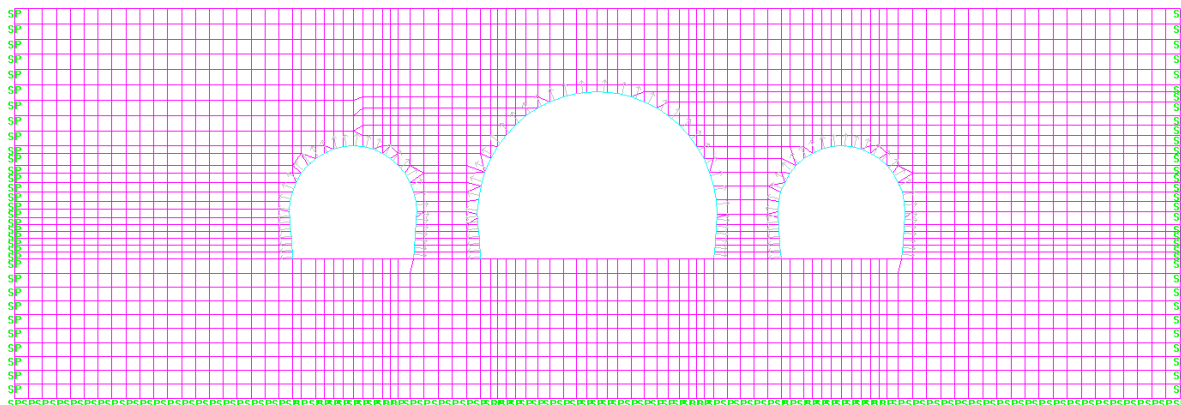


Ilustração 13 - Esquema de cálculo da Boca de Saída, para análise dinâmica.

Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

2.5.3. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

2.5.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

2.5.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

Neste caso, como as galerias ascendentes e descendentes têm as mesmas características, irá se estudar uma secção e considerar o comportamento semelhante para as duas.

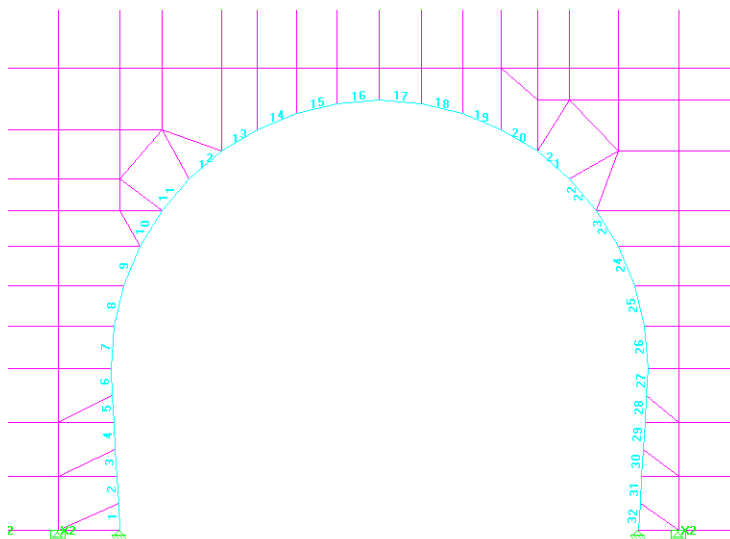


Ilustração 14 - Numeração das barras do arco menor da Boca de Saída.

De seguida representam-se duas tabelas, Tabela 7 e 8, com os esforços e tensões actuaes na secção do túnel.

Tabela 7 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.

COMBINAÇÃO ELU

Galeria Ascendente

	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-2310	-122	-1816,67	-5883,33
	2	-2299	-22,3	-3460,00	-4203,33
Barra 7	1	-2447	84,1	-5480,00	-2676,67
	2	-2442,5	0,1	-4072,50	-4069,17
	3	-2438	-12	-3863,33	-4263,33
Barra 14	1	-2118	-66,2	-2426,67	-4633,33
	2	-2014,5	-0,4	-3350,83	-3364,17
	3	-1911	-10	-3018,33	-3351,67
Barra 17	1	-1718	60,5	-3871,67	-1855,00
	2	-1700	106	-4600,00	-1066,67
	3	-1682	66,8	-3916,67	-1690,00

Barra 18	1	-1733	66,8	-4001,67	-1775,00
	2	-1751,5	103	-4635,83	-1202,50
	3	-1770	54,2	-3853,33	-2046,67
Barra 21	1	-2248	-22	-3380,00	-4113,33
	2	-2352	-13	-3703,33	-4136,67
	3	-2456	-74,4	-2853,33	-5333,33
Barra 28	1	-3930	80,2	-7886,67	-5213,33
	2	-3938	204	-9963,33	-3163,33
Barra 34	1	-4642	-413	-853,33	-14620,00
	2	-4658	-804	5636,67	-21163,33

Tabela 8 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Frequente.

COMBINAÇÃO FREQUENTE

Galeria Ascendente

	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-1702	-90,9	-1321,67	-4351,67
	2	-1694	-20	-2490,00	-3156,67
Barra 7	1	-1802	84,1	-4405,00	-1601,67
	2	-1795	8,4	-3131,67	-2851,67
Barra 14	1	-1562	-49,1	-1785,00	-3421,67
	2	-1485	-0,4	-2468,33	-2481,67
	3	-1408	-8	-2213,33	-2480,00
Barra 17	1	-1268	44,4	-2853,33	-1373,33
	2	-1254,5	78,1	-3392,50	-789,17
	3	-1241	49	-2885,00	-1251,67
Barra 18	1	-1279	49	-2948,33	-1315,00
	2	-1292,5	75,9	-3419,17	-889,17
	3	-1306	39,6	-2836,67	-1516,67
Barra 21	1	-1659	-18	-2465,00	-3065,00
	2	-1736	-12	-2693,33	-3093,33
	3	-1813	-55,2	-2101,67	-3941,67
Barra 28	1	-2900	59,7	-5828,33	-3838,33
	2	-2506	151	-6693,33	-1660,00
Barra 34	1	-3426	-305	-626,67	-10793,33
	2	-3434	-595	4193,33	-15640,00

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = $33,6 \times 10^3$ kPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4 \times 10^3$ kPa.

Agora analisando a Galeria Central da boca de saída:

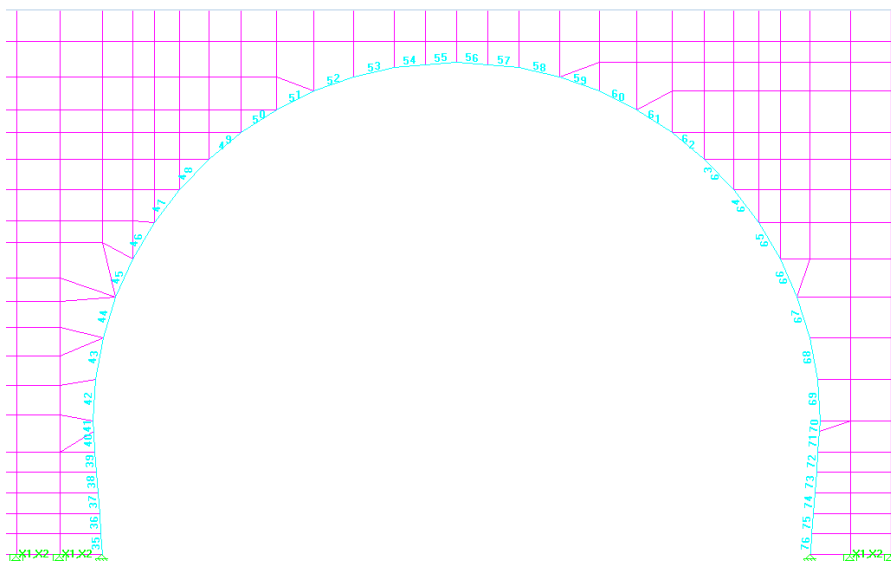


Ilustração 15 - Numeração das barras do arco central da Boca de Saída.

De seguida representam-se duas tabelas, Tabela 6 e 7, com os esforços e tensões actuantes na secção do túnel.

Tabela 9 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Limite Último.

COMBINAÇÃO ELU					
Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-7142	-76,7	-10625,00	-13181,67
	2	-7131	56,5	-12826,67	-10943,33
Barra 41	1	-7647	-42	-12045,00	-13445,00
	2	-7642	-205	-9320,00	-16153,33
Barra 48	1	-6094	-179	-7173,33	-13140,00
	2	-5856,5	-106	-7994,17	-11527,50
	3	-5619	-167	-6581,67	-12148,33
Barra 55	1	-2431	224	-7785,00	-318,33
	2	-2429	152	-6581,67	-1515,00
Barra 56	1	-2403	152	-6538,33	-1471,67
	2	-2430,5	256	-8317,50	215,83
	3	-2458	228	-7896,67	-296,67
Barra 63	1	-5618	-167	-6580,00	-12146,67
	2	-5856	-106	-7993,33	-11526,67
	3	-6094	-179	-7173,33	-13140,00
Barra 70	1	-7617	-203	-9311,67	-16078,33
	2	-7617	-58	-11728,33	-13661,67
Barra 76	1	-7129	55,5	-12806,67	-10956,67
	2	-7140	75,9	-13165,00	-10635,00

Tabela 10 - Valores de esforços e tensões para a Combinação Estado Freqüente.

COMBINAÇÃO FREQUENTE

Galeria Central Ascendente

	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.m)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-5295	-57,6	-7865,00	-9785,00
	2	-5286	41,2	-9496,67	-8123,33
Barra 41	1	-5648	-32	-8880,00	-9946,67
	2	-5559	-151	-6748,33	-11781,67
Barra 48	1	-4500	-132	-5300,00	-9700,00
	2	-4324	-78,6	-5896,67	-8516,67
	3	-4148	-124	-4846,67	-8980,00
Barra 55	1	-1795	166	-5758,33	-225,00
	2	-1794	112	-4856,67	-1123,33
Barra 56	1	-1774	112	-4823,33	-1090,00
	2	-1794,5	189	-6140,83	159,17
	3	-1815	168	-5825,00	-225,00
Barra 63	1	-4148	-123	-4863,33	-8963,33
	2	-4324	-78,4	-5900,00	-8513,33
	3	-4500	-132	-5300,00	-9700,00
Barra 70	1	-5626	-39	-8726,67	-10026,67
	2	-5626	106	-7610,00	-11143,33
Barra 76	1	-5266	40,4	-9450,00	-8103,33
	2	-5274	-57	-9740,00	-7840,00

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = $33,6 \times 10^3$ kPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4 \times 10^3$ kPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura para Galeria Central e Galerias Ascendentes e Descendentes em ambas as combinações, garantido assim a segurança.

3. CAPÍTULO 2

Como já foi referido, este capítulo aborda o estudo de três secções que se localizam por baixo das imediações do Hotel Batalha e perceber qual a influência das instalações do Hotel Batalha tem sobre o túnel.

Para isso o estudo começa com a análise das secções em causa não considerando a sobrecarga devido ao Hotel no modelo. Isto, para saber as deformações e esforços e por fim as tensões que o túnel está sujeito.

Concretizado o parágrafo anterior, introduz-se no modelo a sobrecarga do Hotel e ver qual a variação das deformações, esforços e tensões e verificar se essa variação é significativa para equilíbrio estrutural do túnel.

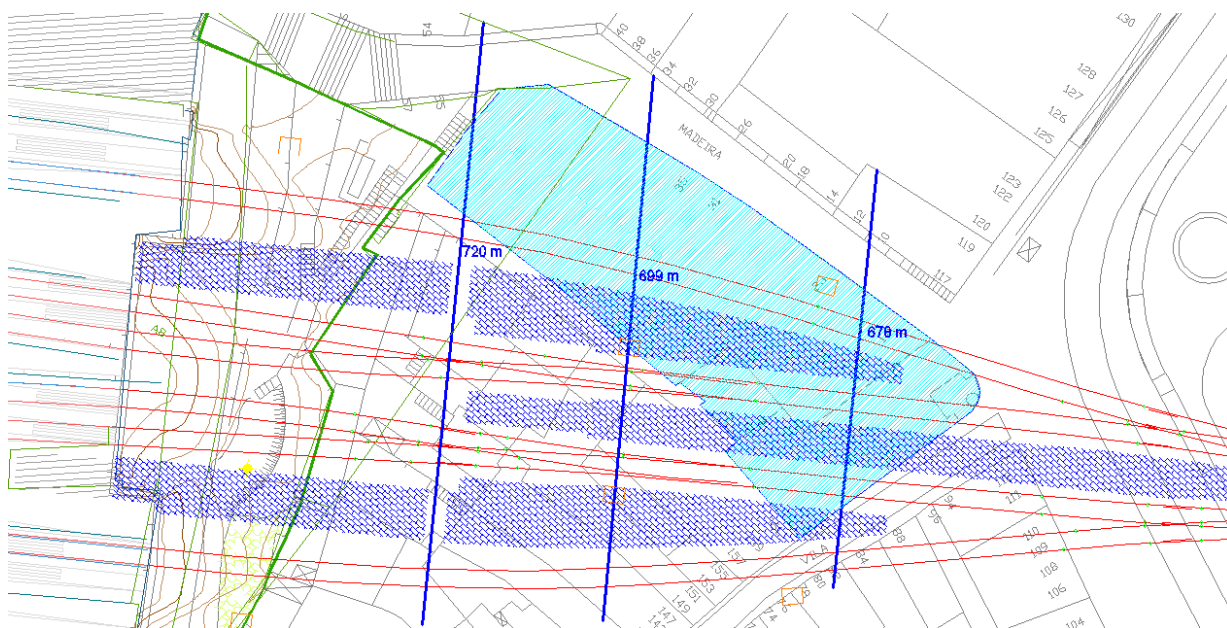


Ilustração 16 - Localização dos cortes transversais e da localização do Hotel Batalha.

O hotel é assimétrico constituído por dois blocos, um com seis pisos e outro com sete pisos.

Neste caso, as acções à superfície correspondem às exercidas pelo hotel e edifícios existentes. As combinações de acções consideradas foram as referentes às combinações Frequentes e dos Estados Limites Últimos conforme o estabelecido no RSAEP. Estas duas hipóteses foram utilizadas para avaliar a influência das cargas à superfície no comportamento global do maciço e do túnel. Assim, definiu-se para a zona de implantação do hotel e edifícios, uma carga permanente característica por piso (G_k) de 8kN/m^2 e uma sobrecarga de utilização por piso no valor de $2,0\text{kN/m}^2$. O valor do ϕ_1 a considerar para as combinações frequentes é de 0,3 e do ϕ_2 de 0,2.

Deste modo e considerando que os edifícios têm, em média quatro pisos obtiveram-se as combinações de acções que se apresentam na Tabela 11.

Tabela 11 - Designação das Combinações para as sobrecargas.

Zona do Hotel		
Bloco de 6 piso		
Combinação Estado Limite Último	$P_{sd} = 6 \times 1,5 \times (G_k + Q_k)$	$P_{sd} = 90 \text{ kN/m}^2$
Combinação Freqüente	$P_{sd} = G_k + \varphi_1 \times Q_k + \left(\sum_{n=1} \varphi_2 \times Q_{ki} \right)$	
Acção Variável Base Hotel	$P_{sd} = 6 \times (8 + 0,3 \times 2) + 4 \times (8 + 0,2 \times 2)$	
Acção Variável Base Edifícios	$P_{sd} = 4 \times (8 + 0,3 \times 2) + 6 \times (8 + 0,2 \times 2)$	
Bloco de 7 piso		
Combinação Estado Limite Último	$P_{sd} = 7 \times 1,5 \times (G_k + Q_k)$	$P_{sd} = 105 \text{ kN/m}^2$
Combinação Freqüente	$P_{sd} = G_k + \varphi_1 \times Q_k + \left(\sum_{n=1} \varphi_2 \times Q_{ki} \right)$	
Acção Variável Base Hotel	$P_{sd} = 7 \times (8 + 0,3 \times 2) + 4 \times (8 + 0,2 \times 2)$	
Acção Variável Base Edifícios	$P_{sd} = 4 \times (8 + 0,3 \times 2) + 7 \times (8 + 0,2 \times 2)$	

Assim sendo as secções 0+678m e 0+699m irão ser analisadas com uma sobrecarga total de, respectivamente, 93,8 kN/m² e a secção 0+720m com uma sobrecarga de 85,2 kN/m².

3.1. SECÇÃO 0+678M

3.1.1. ACÇÕES ESTÁTICAS

Acção Vertical

A Secção 0+678m como mostra a ilustração, Ilustração 17, é constituída por quatro arcos, cujas as dimensões são semelhantes.

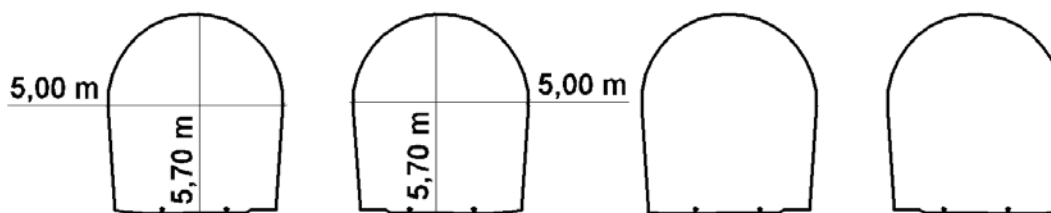


Ilustração 17 - Representação da Secção 0+678m.

Segundo o relatório do LNEC esta secção também se encontra na parte do maciço com melhor classificação, nomeadamente ZG1, portanto:

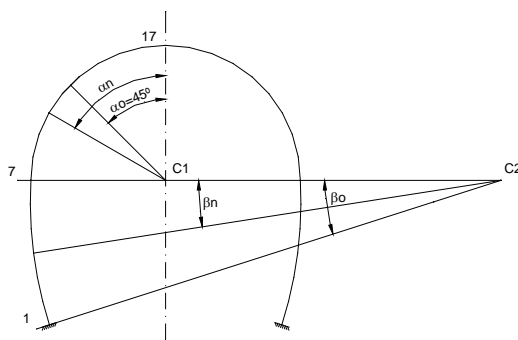
- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 5,67 \text{ m}$;
- $H = 5,0 \text{ m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 27 \times (5,67 + 5,0) = 316,90 \text{ kN/m.}$$

Accção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,86^\circ$$

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,86°	3,86°	0,0000
2	3,29°	3,86°	0,2732
3	2,72°	3,86°	0,5031
4	2,16°	3,86°	0,6865
5	1,59°	3,86°	0,8301
6	1,02°	3,86°	0,9301
7	0,45°	3,86°	0,9864
8	0,00°	3,86°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\text{sen}^2 \beta_n}{\text{sen}^2 \beta_0}$
8	90,00°	45,00°	1,0000
9	80,00°	45,00°	0,9397
10	70,00°	45,00°	0,7660
11	60,00°	45,00°	0,5000
12	50,00°	45,00°	0,1736
13	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 8 e 26, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á nas Galerias Ascendentes e Descendentes:

- Hasteal Esquerdo:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 44,80 \times 10^{-6} \text{m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 2,91 \times 10^{-7} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

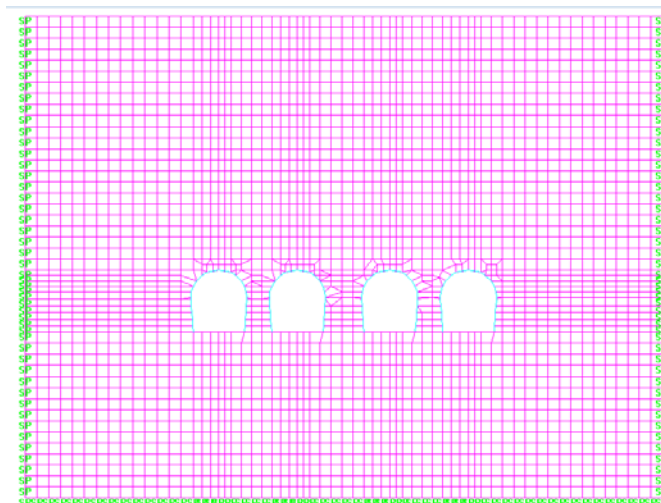
$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{44,80 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 2,91 \times 10^{-7}} = 130,88 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 11,65 \times 10^{-6} \text{m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 8,20 \times 10^{-8} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{11,65 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 8,20 \times 10^{-8}} = 87,44 \text{ kN/m}^2$$

3.1.2. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

3.1.3. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

3.1.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

3.1.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Como já foi referido, a verificação das tensões será feita inicialmente sem a introdução da sobrecarga do hotel, depois de analisado os esforços e as tensões, introduz-se esta sobrecarga e observar qual a variação dos mesmos.

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

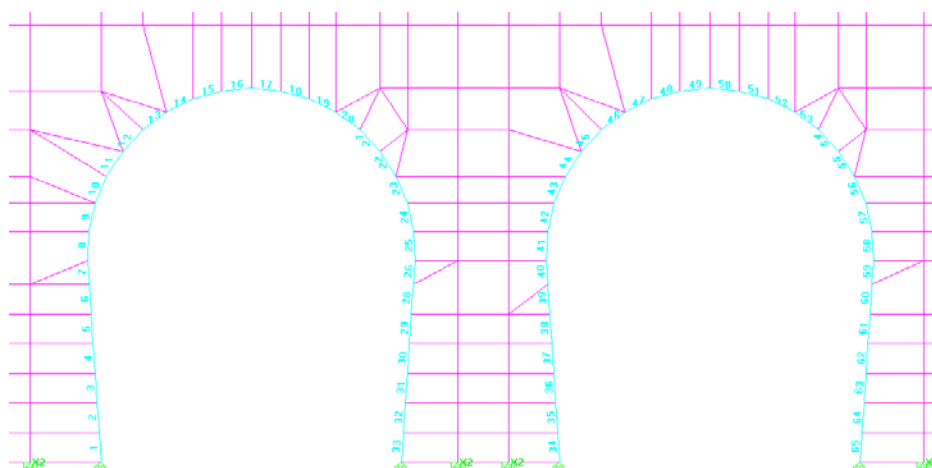


Ilustração 18 - Numeração das barras do arco Ascendente e Central Ascendente.

De seguida representam-se duas tabelas com o que foi referido anteriormente, Tabela 1 e Tabela 2, com os esforços, os deslocamentos e tensões actuantes na secção do túnel, para o arco Ascendente.

Tabela 12 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-207	5	-428,33	-261,67
	2	-197	-2,1	-293,33	-363,33
Barra 7	1	-277	-0,1	-460,00	-463,33
	2	-273	1,21	-475,17	-434,83
	3	-269	-3,73	-386,17	-510,50
Barra 12	1	-303	-11,3	-316,67	-693,33
	2	-250	-2,8	-370,00	-463,33
	3	-197	-6,8	-215,00	-441,67
Barra 16	1	-28,4	-0,3	-52,33	-42,33
	2	-19,15	11,7	-226,92	163,08
	3	-9,9	0,8	-29,83	-3,17
Barra 33	1	-371	-14,4	-858,33	-378,33
	2	-381	0	-635,00	-635,00
Barra 26	1	-363	3,33	-660,50	-549,50
	2	-367	0,37	-617,83	-605,50
	3	-371	-0,3	-613,33	-623,33
Barra 21	1	-152	-3,4	-310,00	-196,67

	2	-205	1,2	-321,67	-361,67
	3	-258	6	-530,00	-330,00
Barra 17	1	3,9	0,8	-6,83	19,83
	2	-6,75	12,2	-214,58	192,08
	3	-17,4	-1	-45,67	-12,33

Tabela 13 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente

	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-227	20,7	-723,33	-33,33
	2	-217	-2,8	-315,00	-408,33
Barra 7	1	-343	-0,6	-561,67	-581,67
	2	-339	0,44	-572,33	-557,67
	3	-335	-5,1	-473,33	-643,33
Barra 12	1	-341	-12,5	-360,00	-776,67
	2	-288	-3,3	-425,00	-535,00
	3	-235	-6,8	-278,33	-505,00
Barra 16	1	-7,5	1,8	-42,50	17,50
	2	1,75	13,9	-228,75	234,58
	3	11	2,9	-30,00	66,67
Barra 33	1	-434	0,5	-731,67	-715,00
	2	-444	-16,2	-470,00	-1010,00
Barra 26	1	-429	-4,1	-783,33	-646,67
	2	-437	-0,4	-721,67	-735,00
Barra 21	1	-181	-3	-351,67	-251,67
	2	-234	1,1	-371,67	-408,33
	3	-287	-6,8	-591,67	-365,00
Barra 17	1	26,3	2,9	-4,50	92,17
	2	17,15	14,4	-211,42	268,58
	3	8	2,8	-33,33	60,00

Tabela 14 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Frequente.

Galeria Ascendente

	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-147	4,1	-313,33	-176,67
	2	-140	-1,6	-206,67	-260,00
Barra 7	1	-198	-0,2	-326,67	-333,33
	2	-195	0,9	-340,00	-310,00
	3	-192	-2,71	-274,83	-365,17
Barra 12	1	-218	-8,3	-225,00	-501,67
	2	-179	-2,1	-263,33	-333,33
	3	-140	-5,5	-141,67	-325,00
Barra 16	1	-17,3	-0,29	-33,67	-24,00
	2	-10,9	8,61	-161,67	125,33
	3	-4,5	0,8	-20,83	5,83
Barra 33	1	-264	0	-440,00	-440,00
	2	-272	-10,1	-285,00	-621,67
Barra 26	1	-260	-2,4	-393,33	-473,33
	2	-273	0,25	-459,17	-450,83
	3	-286	-0,2	-473,33	-480,00
Barra 21	1	-107	-2,5	-136,67	-220,00

	2	-146	0,87	-257,83	-228,83
	3	-185	-4,48	-233,67	-383,00
Barra 17	1	6,58	0,2	7,63	14,30
	2	-0,295	8,98	-150,16	149,18
	3	-7,17	1	-28,62	4,72

Tabela 15 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Freqüente.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-152	7,2	-373,33	-133,33
	2	-144	-1,8	-210,00	-270,00
Barra 7	1	-212	-0,2	-350,00	-356,67
	2	-209	0,74	-360,67	-336,00
	3	-206	-3	-293,33	-393,33
Barra 12	1	-227	-8,6	-235,00	-521,67
	2	-187,5	-2,2	-275,83	-349,17
	3	-148	-5,5	-155,00	-338,33
Barra 16	1	-13,5	0,1	-24,17	-20,83
	2	-6,6	9,1	-162,67	140,67
	3	0,3	0,8	-12,83	13,83
Barra 33	1	-278	0	-463,33	-463,33
	2	-285	-10,6	-298,33	-651,67
Barra 26	1	-274	-2,6	-413,33	-500,00
	2	-277	0,19	-464,83	-458,50
	3	-280	-0,2	-463,33	-470,00
Barra 21	1	-113	-2,5	-146,67	-230,00
	2	-152,5	0,84	-268,17	-240,17
	3	-192	-4,7	-241,67	-398,33
Barra 17	1	10,7	0,82	4,17	31,50
	2	3,85	9,4	-150,25	163,08
	3	-3	0,88	-19,67	9,67

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = 33,6 MPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4$ MPa.

De seguida representa-se quatro tabelas com o que foi referido no parágrafo anterior, Tabela 16, 17, 18 e 19, para a Galeria Central Ascendente:

Tabela 16 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 34	1	-344	-7,5	-448,33	-698,33
	2	-334	0,88	-571,33	-542,00
Barra 40	1	-404	0,68	-684,67	-662,00
	2	-396	-5,77	-563,83	-756,17
Barra 45	1	-291	-8,97	-335,50	-634,50
	2	-238	-1	-380,00	-413,33
	3	-185	-4,8	-228,33	-388,33
Barra 49	1	2	1,3	-18,33	25,00
	2	11,1	13	-198,17	235,17
	3	20,2	1,5	8,67	58,67
Barra 65	1	-332	1,9	-585,00	-521,67
	2	-342	-11,5	-378,33	-761,67
Barra 59	1	-356	-2,8	-546,67	-640,00
	2	-364	0,48	-614,67	-598,67
Barra 54	1	-203	-4	-271,67	-405,00
	2	-256,5	-0,8	-414,17	-440,83
	3	-310	-7,6	-390,00	-643,33
Barra 50	1	1,5	1,5	-22,50	27,50
	2	12,8	12,8	-192,00	234,67
	3	2	1	-13,33	20,00

Tabela 17 - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 34	1	-396	-8,2	-523,33	-796,67
	2	-386	1,3	-665,00	-621,67
Barra 40	1	-468	0,87	-794,50	-765,50
	2	-460	-6,5	-658,33	-875,00
Barra 45	1	-324	-9,6	-380,00	-700,00
	2	-271	-1	-435,00	-468,33
	3	-218	-4,7	-285,00	-441,67
Barra 49	1	0,1	3,1	-51,50	51,83
	2	9,25	14,8	-231,25	262,08
	3	18,4	3,4	-26,00	87,33
Barra 65	1	-361	2,1	-636,67	-566,67
	2	-371	-9,7	-456,67	-780,00
Barra 59	1	-404	-3,5	-615,00	-731,67
	2	-412	0,33	-692,17	-681,17
Barra 54	1	-238	-4,2	-326,67	-466,67
	2	-291	-0,8	-471,67	-498,33
	3	-344	-8,7	-428,33	-718,33
Barra 50	1	16,9	3,4	-28,50	84,83
	2	7,6	14,5	-229,00	254,33
	3	-1,7	2,5	-44,50	38,83

Tabela 18 - Valores de esforços e tensões sem a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Freqüente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 34	1	-248	-5,7	-318,33	-508,33
	2	-240	0,57	-409,50	-390,50
Barra 40	1	-288	0,48	-488,00	-472,00
	2	-283	-4,13	-402,83	-540,50
Barra 45	1	-207	-6,5	-236,67	-453,33
	2	-168	-0,5	-271,67	-288,33
	3	-129	-3,5	-156,67	-273,33
Barra 49	1	-7,39	0,78	-25,32	0,68
	2	-0,525	9,4	-157,54	155,79
	3	6,34	0,93	-4,93	26,07
Barra 65	1	-230	-7,3	-261,67	-505,00
	2	-238	1,3	-375,00	-418,33
Barra 59	1	-250	-2,2	-380,00	-453,33
	2	-256	0,2	-430,00	-423,33
Barra 54	1	-143	-3,1	-186,67	-290,00
	2	-182,5	-0,1	-302,50	-305,83
	3	-222	-5,6	-276,67	-463,33
Barra 50	1	5,75	0,93	-5,92	25,08
	2	1,76	9,3	-152,07	157,93
	3	-7,98	0,8	-26,63	0,03

Tabela 19 - - Valores de esforços e tensões com a actuação da sobrecarga do hotel, para a Combinação Freqüente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 34	1	-259	-5,8	-335,00	-528,33
	2	-251	0,69	-429,83	-406,83
Barra 40	1	-302	0,54	-512,33	-494,33
	2	-296	-4,32	-421,33	-565,33
Barra 45	1	-215	-6,6	-248,33	-468,33
	2	-175,5	-0,5	-284,17	-300,83
	3	-136	-3,5	-168,33	-285,00
Barra 49	1	-4,8	1,2	-28,00	12,00
	2	2	9,8	-160,00	166,67
	3	8,8	1,3	-7,00	36,33
Barra 65	1	-238	-7,1	-278,33	-515,00
	2	-245	1,4	-385,00	-431,67
Barra 59	1	-261	-2,1	-400,00	-470,00
	2	-267	0,4	-451,67	-438,33
Barra 54	1	-151	-3,1	-200,00	-303,33
	2	-190	-0,2	-313,33	-320,00
	3	-229	-5,8	-285,00	-478,33
Barra 50	1	8,1	1,3	-8,17	35,17
	2	1,25	9,7	-159,58	163,75
	3	-5,6	0,85	-23,50	4,83

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = $33,6 \times 10^{-3}$ kPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33,6 / 1,50 = 22,4 \times 10^{-3}$ kPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção para ambas as combinações estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura, garantido assim a segurança.

3.2. SECÇÃO 0+699M

3.2.1. ACÇÕES ESTÁTICAS

Accão Vertical

A Secção 0+699m como mostra a ilustração, Ilustração 14, é constituída por quatro Galerias, cujas dimensões são iguais para as Galerias Ascendentes e Descendentes, e por duas galerias de menores dimensões, Galerias Central Descendente e Ascendente.

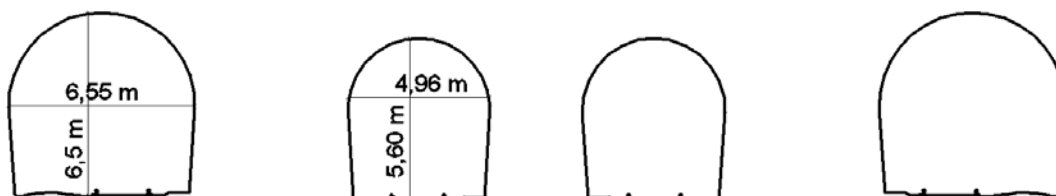


Ilustração 19 - Representação da Secção 0+699m.

Esta secção também se encontra na parte do maciço com melhor classificação, nomeadamente ZG1, portanto:

Nas galerias Central Descendente e Ascendente:

- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 6,55 \text{ m}$;
- $H = 6,5 \text{ m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 27 \times (6,55 + 6,5) = 387,60 \text{ kN/m.}$$

Para as galerias Ascendente e Descendente:

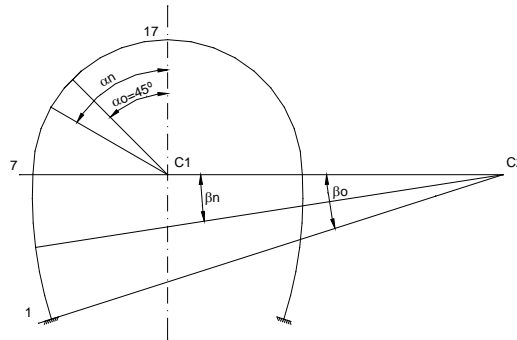
- $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 4,96 \text{ m}$;
- $H = 5,6 \text{ m}$;
- $E = 19,5 \text{ GPa}$

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 27 \times (4,96 + 5,6) = 278,78 \text{ kN/m.}$$

Acção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,93^\circ$$

Os valores dos arcos das galerias Ascendentes e Descendentes são:

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,93°	3,93°	0,0000
2	3,45°	3,93°	0,2291
3	2,96°	3,93°	0,4323
4	2,48°	3,93°	0,6014
5	1,99°	3,93°	0,7433
6	1,51°	3,93°	0,8522
7	1,03°	3,93°	0,9312
8	0,54°	3,93°	0,9811
9	0,00°	3,93°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\text{sen}^2 \beta_n}{\text{sen}^2 \beta_0}$
9	90,00°	45,00°	1,0000
10	80,00°	45,00°	0,9397
11	70,00°	45,00°	0,7660
12	60,00°	45,00°	0,5000
13	50,00°	45,00°	0,1736
14	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 9 e 27, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á nas Galerias ascendentes e descendentes:

- Hasteal Esquerdo:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 54,99 \times 10^{-6} \text{ m}$
- Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 3,47 \times 10^{-7} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{54,99 \times 10^{-6}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 3,47 \times 10^{-7}} = 138,09 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 58,16 \times 10^{-7} \text{ m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 9,90 \times 10^{-8} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{58,16 \times 10^{-7}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 9,90 \times 10^{-8}} = 38,70 \text{ kN/m}^2$$

Os valores dos arcos das galerias Central Ascendentes e Descendentes são:

Neste caso tem-se:

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,24°	3,24°	0,0000
2	2,83°	3,24°	0,2369
3	2,41°	3,24°	0,4465
4	2,00°	3,24°	0,6187
5	1,58°	3,24°	0,7620
6	1,17°	3,24°	0,8695
7	0,75°	3,24°	0,9464
8	0,34°	3,24°	0,9890
9	0,00°	3,24°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$
9	90,00°	45,00°	1,0000
10	80,00°	45,00°	0,9397
11	70,00°	45,00°	0,7660
12	60,00°	45,00°	0,5000
13	50,00°	45,00°	0,1736
14	45,00°	45,00°	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 9, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á nas Galerias ascendentes e descendentes:

- Hasteal Esquerdo:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

$$\delta_h = 37,99 \times 10^{-7} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 7,30 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{37,99 \times 10^{-7}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 1,14 \times 10^{-7}} = 22,98 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:

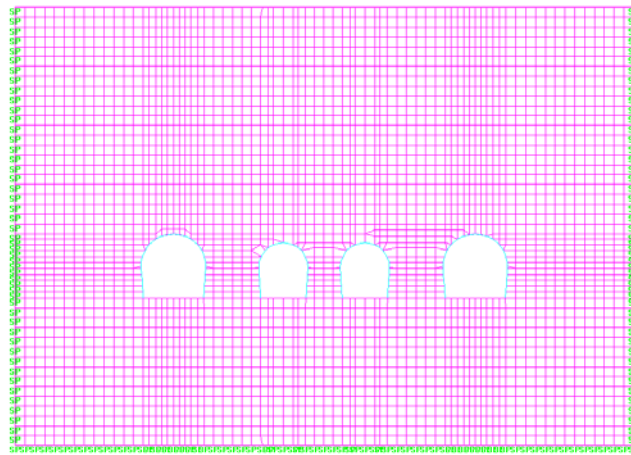
$$\delta_h = 17,18 \times 10^{-7} \text{ m}$$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

$$\delta_{hq} = 7,30 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Admitindo um coeficiente de reacção de 19,5 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{17,18 \times 10^{-7}}{\frac{1}{19,5 \times 10^6} + 7,30 \times 10^{-8}} = 13,82 \text{ kN/m}^2$$

3.2.2. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra. Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5 \%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

3.2.3. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

3.2.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

3.2.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

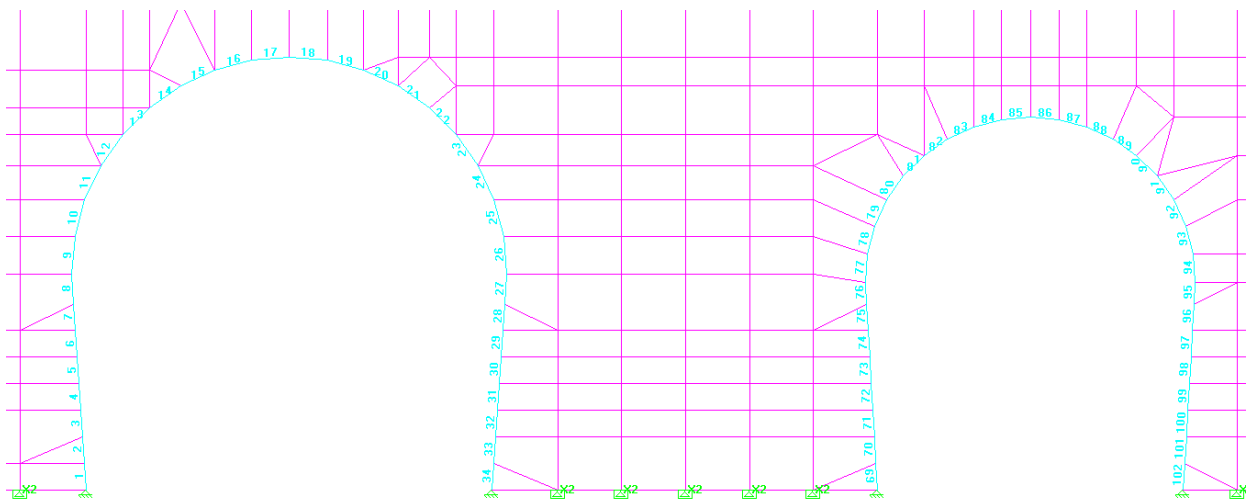


Ilustração 20 - Numeração das barras do arco Ascendente e Central Ascendente.

De seguida representa-se um quadro, Quadro 21, com os esforços e tensões actuantes na secção do túnel, para o arco da Galeria Descendente.

Tabela 20 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-214	12,2	-560,00	-153,33
	2	-206	1,8	-313,33	-373,33
Barra 8	1	-334	0,5	-565,00	-548,33
	2	-329	1,8	-578,33	-518,33
	3	-324	-7,7	-411,67	-668,33
Barra 13	1	-336	-11,8	-363,33	-756,67
	2	-257	0,9	-443,33	-413,33
	3	-178	-8,9	-148,33	-445,00
Barra 17	1	13,1	-6,5	-86,50	130,17
	2	26,6	15,5	-214,00	302,67
	3	40,1	-6,5	175,17	-41,50
Barra 34	1	-281	-1,4	-491,67	-445,00
	2	-290	-9,5	-325,00	-641,67
Barra 27	1	-358	-6,2	-493,33	-700,00
	2	-368	1,7	-641,67	-585,00
Barra 22	1	-151	-8,3	-113,33	-390,00
	2	-180	2,5	-341,67	-258,33
	3	-209	-9,2	-195,00	-501,67
Barra 18	1	45,5	-6,5	184,17	-32,50
	2	32	15,5	-205,00	311,67
	3	18,5	-6,5	139,17	-77,50

Tabela 21 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga do hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-231	22,8	-765,00	-5,00
	2	-222	-2	-336,67	-403,33
Barra 8	1	-387	0,1	-646,67	-643,33
	2	-382	1,4	-660,00	-613,33
	3	-377	-8,8	-481,67	-775,00
Barra 13	1	-359	-12,2	-395,00	-801,67
	2	-280	0,7	-478,33	-455,00
	3	-201	-8,7	-190,00	-480,00
Barra 17	1	33,9	-5,2	-30,17	143,17
	2	65,3	16,8	-171,17	388,83
	3	60,9	-5,1	186,50	16,50
Barra 34	1	-310	-1	-533,33	-500,00
	2	-318	-8,2	-393,33	-666,67
Barra 27	1	-401	-7	-551,67	-785,00
	2	-411	1,8	-715,00	-655,00
Barra 22	1	-172	-8,4	-146,67	-426,67
	2	-251	2,3	-456,67	-380,00
	3	-330	-9,6	-390,00	-710,00
Barra 18	1	66,1	-5,1	195,17	25,17
	2	52,65	16,8	-192,25	367,75
	3	39,2	-5,4	155,33	-24,67

Tabela 22 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-153	-7,4	-131,67	-378,33
	2	-147	1,3	-266,67	-223,33
Barra 8	1	-235	0,5	-383,33	-400,00
	2	-231,5	1,4	-409,17	-362,50
	3	-228	-5,5	-471,67	-288,33
Barra 13	1	-240	-8,6	-256,67	-543,33
	2	-181,5	0,73	-314,67	-290,33
	3	-123	-6,6	-95,00	-315,00
Barra 17	1	12	-5	103,33	-63,33
	2	22,05	11,3	-151,58	225,08
	3	32,1	5	136,83	-29,83
Barra 34	1	-192	-0,78	-307,00	-333,00
	2	-199	-5,5	-240,00	-423,33
Barra 27	1	-250	-4,4	-343,33	-490,00
	2	-257	1,2	-448,33	-408,33
Barra 22	1	-150	-6,2	-146,67	-353,33
	2	-186	1,8	-340,00	-280,00
	3	-222	-6,8	-256,67	-483,33
Barra 18	1	35,6	-5	142,67	-24,00
	2	25,65	11,3	-145,58	231,08
	3	15,7	-5	109,50	-57,17

Tabela 23 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga do hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-157	9,7	-423,33	-100,00
	2	-150	-1,4	-226,67	-273,33
Barra 8	1	-247	0,1	-413,33	-410,00
	2	-243,5	1,3	-427,50	-384,17
	3	-240	-5,7	-305,00	-495,00
Barra 13	1	-246	-8,7	-265,00	-555,00
	2	-187	0,7	-323,33	-300,00
	3	-128	-6,6	-103,33	-323,33
Barra 17	1	16	-4,7	105,00	-51,67
	2	26	11,6	-150,00	236,67
	3	36	-4,7	138,33	-18,33
Barra 34	1	-200	-5,3	-245,00	-421,67
	2	-206	-0,8	-330,00	-356,67
Barra 27	1	-260	-4,6	-356,67	-510,00
	2	-268	1,2	-466,67	-426,67
Barra 22	1	-109	-6,9	-66,67	-296,67
	2	-167,5	-2	-245,83	-312,50
	3	-226	-8,4	-236,67	-516,67
Barra 18	1	39,6	-4,7	144,33	-12,33
	2	29,6	11,6	-144,00	242,67
	3	19,6	-4,8	112,67	-47,33

De seguida vai-se analisar a Galeria Central Ascendente e Descendente. Como o comportamento de ambas as galerias é quase simétrico, vamos analisar a Galeria mais desfavorável.

Tabela 24 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-270	-7,7	-321,67	-578,33
	2	-261	-1	-418,33	-451,67
Barra 42	1	-334	1,7	-585,00	-528,33
	2	-327	-4,6	-468,33	-621,67
Barra 47	1	-276	-5,1	-375,00	-545,00
	2	-232	0,42	-393,67	-379,67
	3	-188	-3,7	-251,67	-375,00
Barra 51	1	-26	2,2	-80,00	-6,67
	2	-18,5	11,9	-229,17	167,50
	3	-11	2,9	-66,67	30,00
Barra 52	1	-7	2,9	-60,00	36,67
	2	-14,5	12,1	-225,83	177,50
	3	-22	2,7	-81,67	8,33
Barra 56	1	-171	-4,3	-213,33	-356,67
	2	-215	-0,5	-350,00	-366,67
	3	-259	-6,7	-320,00	-543,33
Barra 61	1	-331	-3,6	-491,67	-611,67
	2	-338	0,19	-566,50	-560,17
Barra 68	1	-306	-0,99	-493,50	-526,50
	2	-314	-9,3	-368,33	-678,33

Tabela 25 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-297	-10,8	-315,00	-675,00
	2	-298	-1,3	-475,00	-518,33
Barra 42	1	-357	1,8	-625,00	-565,00
	2	350	-4,9	665,00	501,67
Barra 47	1	-281	-4,8	-388,33	-548,33
	2	-237	0,82	-408,67	-381,33
	3	-193	-3,2	-268,33	-375,00
Barra 51	1	-22,4	2,9	-85,67	11,00
	2	-14,9	12,5	-233,17	183,50
	3	-7,4	3,4	-69,00	44,33
Barra 52	1	-6	3,4	-66,67	46,67
	2	-13,65	12,5	-231,08	185,58
	3	-21,3	3	-85,50	14,50
Barra 56	1	-185	-4,7	-230,00	-386,67
	2	-229,5	-1,2	-362,50	-402,50
	3	-274	-7,3	-335,00	-578,33
Barra 61	1	-340	-3,9	-501,67	-631,67

	2	-347	0,05	-579,17	-577,50
Barra 68	1	-302	-0,5	-495,00	-511,67
	2	-310	-7	-400,00	-633,33

Tabela 26 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-187	-6,3	-206,67	-416,67
	2	-181	-0,78	-288,67	-314,67
Barra 42	1	-228	1,2	-400,00	-360,00
	2	-223	-3,1	-320,00	-423,33
Barra 47	1	-189	-3,5	-256,67	-373,33
	2	-156,5	0,48	-268,83	-252,83
	3	-124	-2,6	-250,00	-163,33
Barra 51	1	-17,3	1,2	-48,83	-8,83
	2	-11,75	8,3	-157,92	118,75
	3	-6,2	1,6	-37,00	16,33
Barra 52	1	-4,2	1,6	-33,67	19,67
	2	-9,8	8,5	-158,00	125,33
	3	-15,4	1,5	-50,67	-0,67
Barra 56	1	-116	-3,3	-138,33	-248,33
	2	-148,5	-0,5	-239,17	-255,83
	3	-181	-4,9	-220,00	-383,33
Barra 61	1	-222	-2,4	-330,00	-410,00
	2	-227	0,19	-381,50	-375,17
Barra 68	1	-203	-0,5	-330,00	-346,67
	2	-209	-5,7	-253,33	-443,33

Tabela 27 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 35	1	-194	-6,9	-208,33	-438,33
	2	-188	-0,86	-299,00	-327,67
Barra 42	1	-234	1,2	-410,00	-370,00
	2	-229	-3,2	-328,33	-435,00
Barra 47	1	-192	-3,5	-261,67	-378,33
	2	-159	0,54	-274,00	-256,00
	3	-126	-2,6	-166,67	-253,33
Barra 51	1	-16,8	1,4	-51,33	-4,67
	2	-11,2	8,5	-160,33	123,00
	3	-5,6	1,8	-39,33	20,67
Barra 52	1	-4	1,8	-36,67	23,33
	2	-9,65	8,6	-159,42	127,25
	3	-15,3	1,6	-52,17	1,17
Barra 56	1	-120	-3,4	-143,33	-256,67
	2	-152,5	-0,8	-240,83	-267,50
	3	-185	-5,5	-216,67	-400,00
Barra 61	1	-226	-2,5	-335,00	-418,33
	2	-232	0,05	-387,50	-385,83
Barra 68	1	-204	-0,5	-331,67	-348,33

	2	-211	-5,3	-263,33	-440,00
--	---	------	------	---------	---------

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = 33,6 MPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33.6 / 1,50 = 22,4$ MPa.

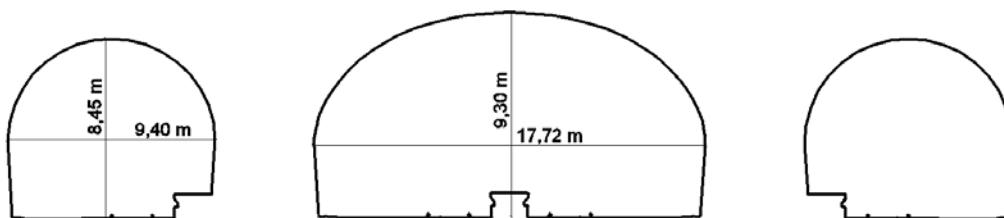
Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura para ambas as combinações, garantido assim a segurança.

3.3. SECÇÃO 0+720M

3.3.1. ACÇÕES ESTÁTICAS

Acção Vertical

A Secção 0+720m é constituída por três galerias, cuja galeria central tem a forma elíptica, galeria Central, e por duas galerias de menor vão, galeria Ascendente e Descendente, cujas dimensões são, como mostra a ilustração 22:



Esta secção se encontra na parte do maciço com um nível abaixo na classificação, nomeadamente ZG2, portanto:

Na galeria Central temos:

- $\gamma = 25$ kN/m³;
- $B = 17,71$ m;
- $H = 9,30$ m;
- $E = 1,7$ GPa.

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 25 \times (17,71 + 9,30) = 742,78 \text{ kN/m.}$$

Para as Galerias Ascendente e Descendente:

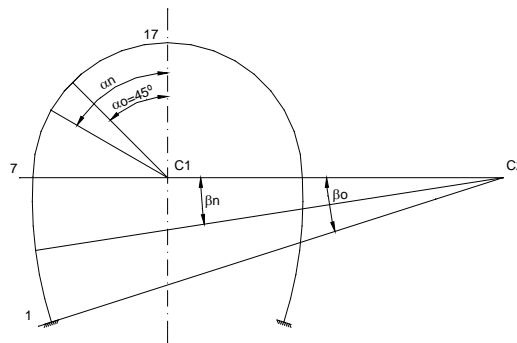
- $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$;
- $B = 9,45 \text{ m}$;
- $H = 8,45 \text{ m}$;
- $E = 1,7 \text{ GPa}$

Portanto o valor da acção vertical é:

$$P = 1,10 \times 25 \times (9,45 + 8,45) = 490,88 \text{ kN/m.}$$

Acção Horizontal

Neste caso tem-se:



$$\alpha_0 = 45,00^\circ$$

$$\beta_0 = 3,93^\circ$$

Assim sendo, obtemos os valores dos arcos da Galeria Central que são:

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,84°	3,84°	0,0000
2	3,47°	3,84°	0,1832
3	2,89°	3,84°	0,4332
4	2,31°	3,84°	0,6378
5	1,73°	3,84°	0,7968
6	1,16°	3,84°	0,9086
7	0,54°	3,84°	0,9802
8	0,00	3,84°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\text{sen}^2 \beta_n}{\text{sen}^2 \beta_0}$
8	90,00°	45,00°	1,0000
9	88,38°	45,00°	0,9984
10	83,37°	45,00°	0,9733
11	79,92°	45,00°	0,9387
12	76,29°	45,00°	0,8877
13	72,42°	45,00°	0,8175
14	68,20°	45,00°	0,7242
15	63,57°	45,00°	0,6038
16	58,34°	45,00°	0,4490
17	52,14°	45,00°	0,2467
18	45,00°	45,00°	0,7242

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 8, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á na Galeria Central:

- Hasteal Esquerdo:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 21,59 \times 10^{-4} \text{ m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 2,22 \times 10^{-6} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 1,7 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{21,59 \times 10^{-4}}{\frac{1}{1,7 \times 10^6} + 2,22 \times 10^{-6}} = 768,74 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 21,22 \times 10^{-4} \text{ m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 2,18 \times 10^{-6} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 1,7 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{21,22 \times 10^{-4}}{\frac{1}{1,7 \times 10^6} + 2,18 \times 10^{-6}} = 765,81 \text{ kN/m}^2$$

Agora estudando as Galerias Ascendente e Descendente obteve-se os seguintes valores para os arcos inferior e superior, como representa-se a seguir:

ARCO INFERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	β_n	β_0	$1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$
1	3,65°	3,65°	0,0000
2	3,01°	3,65°	0,3196
3	2,37°	3,65°	0,5781
4	1,73°	3,65°	0,7751
5	1,10°	3,65°	0,9091
6	0,46°	3,65°	0,9856
7	0,00°	3,65°	1,0000

ARCO SUPERIOR (CARGAS RADIAIS)

Nó	α_n	α_0	$1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$
7	90,00°	45,00°	1,0000
8	80,59°	45,00°	0,9465
9	73,07°	45,00°	0,8304
10	65,24°	45,00°	0,6492
11	56,87°	45,00°	0,4026
12	47,61°	45,00°	0,0910
13	45,00	45,00	0,0000

Conhecidos os deslocamentos horizontais, no nó 7 e 25, (nó que corresponde à largura máxima da secção) para ambas as acções, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á nas Galerias ascendentes e descendentes:

- Hastel Esquerdo:

- Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 32,93 \times 10^{-4} \text{ m}$
- Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 5,42 \times 10^{-6} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 1,7 GPa, temos:

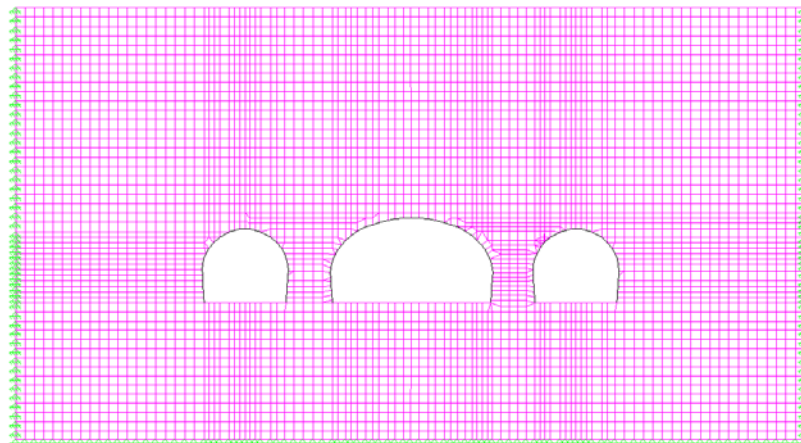
$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{32,93 \times 10^{-4}}{\frac{1}{1,7 \times 10^6} + 5,42 \times 10^{-6}} = 548,34 \text{ kN/m}^2$$

- Hasteal Direito:
 - Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
 $\delta_h = 26,10 \times 10^{-5} \text{ m}$
 - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):
 $\delta_{hq} = 1,09 \times 10^{-6} \text{ m}$

Admitindo um coeficiente de reacção de 1,7 GPa, temos:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \Leftrightarrow q_{m\acute{a}x} = \frac{26,10 \times 10^{-5}}{\frac{1}{1,7 \times 10^6} + 1,09 \times 10^{-6}} = 155,41 \text{ kN/m}^2$$

3.3.2. ACÇÕES DINÂMICAS



Relativamente à sismicidade e de acordo com o capítulo VII do RSA, o túnel está localizado na zona sísmica D, sendo o valor do coeficiente de sismicidade $\alpha_s = 0,30$. Quanto à natureza do terreno, classifica-se como tipo I, ou seja rocha.

Foi efectuado um cálculo sísmico através de métodos de análise dinâmicos. O modelo de cálculo utilizado para esta análise consiste numa área considerável de terreno modulado em elementos finitos, sendo a abóbada e os hasteais do túnel modulados em elementos de barra.

Para dar continuidade ao terreno colocaram-se molas de rigidez compatível com o módulo de deformabilidade do terreno nos elementos laterais e inferiores ao túnel.

O cálculo sísmico foi efectuado pelo programa de cálculo STRAP v. 12.5, considerando os dois tipos da acção sísmica. Adoptou-se o coeficiente de amortecimento $\xi = 5\%$.

No anexo de cálculos apresenta-se um esquema elucidativo do modelo utilizado.

Incluem-se também em anexo, esquemas com a configuração dos vários modos de vibração, que se calcularam em número de 10.

3.3.3. ESFORÇOS

Todos os diagramas de esforços e combinações de esforços obtidos pelas acções acima referidas apresentam-se nos anexos de cálculos.

3.3.4. VERIFICAÇÕES/DIMENSIONAMENTO

Verificaram-se as tensões de compressão nos blocos de alvenaria de granito que constituem a abóbada e os hasteais.

3.3.4.1. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Para a verificação das tensões considerou-se uma secção de 0,60 x 1,00 para os hasteais e abóbada.

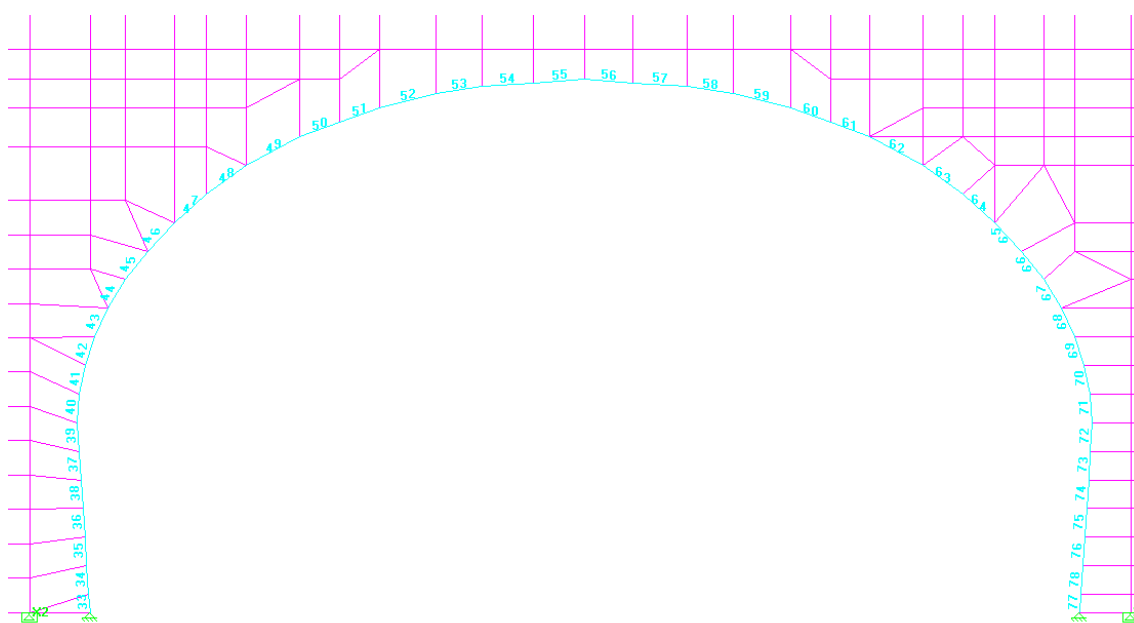


Ilustração 21 - Numeração das barras do arco da Galeria Central.

De seguida representam-se quatro tabelas, Tabela 29, 30, 31 e 32, com os esforços e tensões actuantes na secção do túnel, para a Galeria Central.

Tabela 28 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 33	1	-7477	-749	21,67	-24945,00
	2	-7470	-436	-5183,33	-19716,67
Barra 39	1	-7201	174	-14901,67	-9101,67
	2	-7270	-173	-9233,33	-15000,00
Barra 49	1	-5261	-100	-7101,67	-10435,00
	2	-5085,5	-20	-8142,50	-8809,17
	3	-4910	-143	-5800,00	-10566,67
Barra 55	1	-3042	111	-6920,00	-3220,00
	2	-3010,5	169	-7834,17	-2200,83
	3	-2979	18	-5265,00	-4665,00
Barra 56	1	-2981	18	-5268,33	-4668,33
	2	-3010,5	155	-7600,83	-2434,17
	3	-3040	107	-6850,00	-3283,33
Barra 62	1	-4946	-133	-6026,67	-10460,00
	2	-5121	-46	-7768,33	-9301,67
	3	-5296	-126	-6726,67	-10926,67
Barra 72	1	-6747	-118	-9278,33	-13211,67
	2	-6758	205	-14680,00	-7846,67
Barra 77	1	-6810	-322	-5983,33	-16716,67
	2	-6817	-618	-1061,67	-21661,67

Tabela 29 - Valores dos esforços e tensões com influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 33	1	-7430	-782	650,00	-25416,67
	2	-7423	-457	-4755,00	-19988,33
Barra 39	1	-7188	176	-14913,33	-9046,67
	2	-7177	-166	-9195,00	-14728,33
Barra 49	1	-5177	-98	-6995,00	-10261,67
	2	-5001,5	-20	-8002,50	-8669,17
	3	-4826	-142	-5676,67	-10410,00
Barra 55	1	-3044	108	-6873,33	-3273,33
	2	-3012,5	165	-7770,83	-2270,83
	3	-2981	10	-5135,00	-4801,67
Barra 56	1	-2987	10	-5145,00	-4811,67
	2	-3016,5	150	-7527,50	-2527,50
	3	-3046	103	-6793,33	-3360,00
Barra 62	1	-4874	-137	-5840,00	-10406,67
	2	-5049	-49,4	-7591,67	-9238,33
	3	-5224	-130	-6540,00	-10873,33
Barra 72	1	-6515	-107	-9075,00	-12641,67
	2	-6526	206	-14310,00	-7443,33
Barra 77	1	-6589	-337	-5365,00	-16598,33
	2	-6596	-622	-626,67	-21360,00

Tabela 30 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 33	1	-5360	-575	650,00	-18516,67
	2	-5355	-337	-3308,33	-14541,67
Barra 39	1	-5185	131	-10825,00	-6458,33
	2	-5177	-117	-6678,33	-10578,33
Barra 49	1	-3781	-71,8	-5105,00	-7498,33
	2	-3651,5	-12	-5885,83	-6285,83
	3	-3522	-74,8	-7116,67	-4623,33
Barra 55	1	-2223	77,5	-4996,67	-2413,33
	2	-2199,5	121	-5682,50	-1649,17
	3	-2176	8	-3760,00	-3493,33
Barra 56	1	-2178	8	-3763,33	-3496,67
	2	-2200	110	-5500,00	-1833,33
	3	-2222	74,7	-4948,33	-2458,33
Barra 62	1	-3551	-101	-4235,00	-7601,67
	2	-3680,5	-36	-5534,17	-6734,17
	3	-3810	-95,5	-4758,33	-7941,67
Barra 72	1	-4758	-75,4	-9186,67	-6673,33
	2	-4766	153	-10493,33	-5393,33
Barra 77	1	-4828	-256	-3780,00	-12313,33
	2	-4834	-471	-206,67	-15906,67

Tabela 31 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga hotel para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Frequente.

Galeria Central Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 33	1	-5368	-580	720,00	-18613,33
	2	-5363	-340	-3271,67	-14605,00
Barra 39	1	-5187	131	-10828,33	-6461,67
	2	-5179	-117	-6681,67	-10581,67
Barra 49	1	-3776	-74,3	-5055,00	-7531,67
	2	-130	-12	-16,67	-416,67
	3	3516	77,2	4573,33	7146,67
Barra 55	1	-2227	75	-4961,67	-2461,67
	2	-2203,5	120	-5672,50	-1672,50
	3	-2180	8	-3766,67	-3500,00
Barra 56	1	-2182	8	-3770,00	-3503,33
	2	-2204	110	-5506,67	-1840,00
	3	-2226	74,2	-4946,67	-2473,33
Barra 62	1	-3547	-101	-4228,33	-7595,00
	2	-3677	-37	-5511,67	-6745,00
	3	-3807	-96	-4745,00	-7945,00
Barra 72	1	-4735	74,2	-9128,33	-6655,00
	2	-4744	153	-10456,67	-5356,67
Barra 77	1	-4805	-256	-3741,67	-12275,00
	2	-4811	-471	-168,33	-15868,33

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = 33,6 MPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33.6 / 1,50 = 22,4$ MPa.

De seguida representa-se uma ilustração, ilustração 18 da Galeria Ascendente e com a numeração das barras e quatro tabelas, Tabelas 33, 34, 35 e 36, com os esforços e tensões indicados:

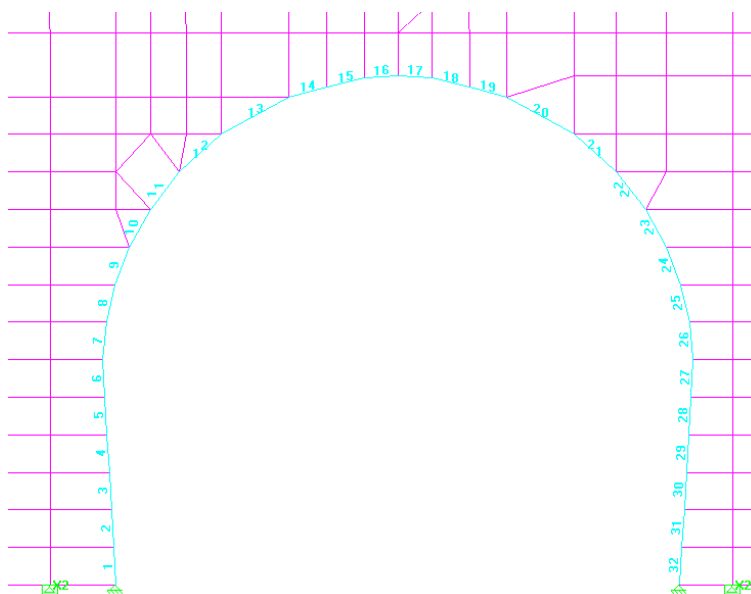


Ilustração 22 - Numeração das barras do arco da Galeria Ascendente.

Tabela 32 - Valores dos esforços e tensões sem influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-4447	-375	-1161,67	-13661,67
	2	-4433	-94,3	-5816,67	-8960,00
Barra 6	1	-4501	122	-9535,00	-5468,33
	2	-4488	-105	-5730,00	-9230,00
Barra 12	1	-3490	-172	-2950,00	-8683,33
	2	-3260,5	-75,8	-4170,83	-6697,50
	3	-3031	-108	-3251,67	-6851,67
Barra 16	1	-1494	129	-4640,00	-340,00
	2	-1478	177	-5413,33	486,67
	3	-1462	150	-4936,67	63,33
Barra 17	1	-1428	150	-4880,00	120,00
	2	-1443,5	186	-5505,83	694,17
	3	-1459	148	-4898,33	35,00
Barra 21	1	-2870	-20	-4450,00	-5116,67
	2	-3099,5	4	-5232,50	-5099,17

	3	-3329	-104	-3815,00	-7281,67
Barra 27	1	-4906	-220	-4510,00	-11843,33
	3	-4919	12	-8398,33	-7998,33
Barra 32	1	-4568	103	-9330,00	-5896,67
	2	-4581	147	-10085,00	-5185,00

Tabela 33 - Valores dos esforços e tensões com influenciada sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Estado Limite Último.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-4516	-360	-1526,67	-13526,67
	2	-4503	-89,6	-6011,67	-8998,33
Barra 6	1	-4578	117	-9580,00	-5680,00
	2	-4564	-114	-3806,67	-9506,67
Barra 12	1	-3477	-170	-5625,00	-8628,33
	2	-3248	71,9	-6611,67	-4215,00
	3	-3019	-102	-5031,67	-6731,67
Barra 16	1	-1436	138	-4693,33	-93,33
	2	-1420	185	-5450,00	716,67
	3	-1404	157	-4956,67	276,67
Barra 17	1	-1375	157	-4908,33	325,00
	2	-1391	193	-5535,00	898,33
	3	-1407	155	-4928,33	238,33
Barra 21	1	-2877	-22	-4795,00	-5161,67
	2	-3106,5	-1	-5177,50	-5194,17
	3	-3336	-109	-5560,00	-7376,67
Barra 27	1	-4898	-224	-8163,33	-11896,67
	2	-4912	8	-8320,00	-8053,33
Barra 32	1	-4514	115	-9440,00	-5606,67
	2	-4527	181	-10561,67	-4528,33

Tabela 34 - Valores dos esforços e tensões sem influência para a Galeria Central Ascendente para a Combinação Freqüente.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-3187	-308	-178,33	-10445,00
	2	-3177	-80,7	-3950,00	-6640,00
Barra 6	1	-3199	93,4	-6888,33	6888,33
	2	-3189	-69,4	-4158,33	-6471,67
Barra 12	1	-2487	-125	6228,33	-6228,33
	2	-2317	-55,1	-2943,33	-4780,00
	3	-2147	-79,6	-2251,67	-4905,00
Barra 16	1	-1053	91,4	-3278,33	-231,67
	2	-1041	127	-3851,67	381,67
	3	-1029	106	-3481,67	51,67
Barra 17	1	-1005	106	-3441,67	91,67
	2	-1016,5	133	-3910,83	522,50
	3	-1028	105	-3463,33	36,67
Barra 21	1	-2032	-18	-3086,67	-3686,67
	2	-2202	1,2	-3690,00	-3650,00
	3	-2372	-76,7	-2675,00	-5231,67

Barra 27	1	-3470	-158	-3150,00	-8416,67
	2	-3480	6	-5900,00	-5700,00
Barra 32	1	-3193	82	-6688,33	-3955,00
	2	-3203	131	-7521,67	-3155,00

Tabela 35 - Valores dos esforços e tensões com influência da sobrecarga hotel para a Galeria Ascendente para a Combinação Freqüente.

Galeria Ascendente					
	Nós	Esforços		Tensão Actuante (kPa)	
		N (kN)	M (kN.M)	Extradorso	Intradorso
Barra 1	1	-3211	-302	-318,33	-10385,00
	2	-3202	-78,7	-4025,00	-6648,33
Barra 6	1	-3228	92,1	-6915,00	6915,00
	2	-3218	-71,9	-4165,00	-6561,67
Barra 12	1	-2494	-125	6240,00	-6240,00
	2	-2324	-54,5	-2965,00	-4781,67
	3	-2154	-78,6	-2280,00	-4900,00
Barra 16	1	-1047	93,6	-3305,00	-185,00
	2	-1035	129	-3875,00	425,00
	3	-1023	108	-3505,00	95,00
Barra 17	1	-1000	108	-3466,67	133,33
	2	-1011,5	135	-3935,83	564,17
	3	-1023	107	-3488,33	78,33
Barra 21	1	-2043	-18	-3105,00	-3705,00
	2	-2213	0,5	-3696,67	-3680,00
	3	-2383	-77,9	-2673,33	-5270,00
Barra 27	1	-3485	-160	-3141,67	-8475,00
	2	-3495	5	-5908,33	-5741,67
Barra 32	1	-3201	83,8	-6731,67	-3938,33
	2	-3211	136	-7618,33	-3085,00

A comparação é efectuada para as seguintes tensões resistentes:

- Abóbada e Hasteais – Granito

Valor médio característico da tensão de rotura à compressão obtido nos ensaios = 33,6 MPa.

Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado = $33.6 / 1,50 = 22,4$ MPa.

Conclui-se assim que os valores da capacidade resistente da secção estão muito abaixo do valor médio característico da tensão de rotura, garantido assim a segurança.

4. CAPÍTULO 3

4.1. SISTEMA DE DRENAGEM LONGITUDINAL

O revestimento encontra-se com manchas decorrentes da existência de água/humidade (de cor esbranquiçada), marcas de lamas nos hasteais, infiltrações com profusão de musgos, estalactites e água corrente com crescendo na aproximação da Boca de Saída, e zonas cobertas por camadas de material de cor negra.

Para o dimensionamento do colector da drenagem longitudinal considerou-se a zona com o maior caudal identificado, que se situa perto da Boca de Saída, com sensivelmente 0,18 l/s.

Com o maior caudal identificado, calculou-se a secção do colector e considerou-se a zona do túnel com maior comprimento que se situa desde da Boca de Entrada (P.k. 1+760,857) até ao P.k. 2+264,107.

Portanto, considerou-se um comprimento de sensivelmente 503 m com uma pendente de cerca 0,5%.

Para os cálculos utilizou-se as Fórmulas empíricas de Manning Strickler, em que a expressão é a seguinte:

$$Q = A \cdot K \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

Em que:

- Q – Caudal escoado (m³/s);
- A – Área da secção molhada (m²);
- K – Coeficiente de rugosidade de Strickler (m^{1/3}/s);
- R – Raio hidráulico (m);
- J – Declive do fundo (m/m).

Considerou-se uma secção rectangular para simplificação nos cálculos e que as fórmulas da área molhada (A), perímetro hidráulico (P) e raio hidráulico (R) são:

- $A = b \cdot h$;
- $P = b + 2 \cdot h$;
- $R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$

O valor do coeficiente de rugosidade do betão é de $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e estudou-se para várias larguras de secções, qual a melhor se enquadrava nas limitações de espaço que se encontra entre o balastro e passadiço existentes.

Logo, com o maior caudal medido de $0,18 \text{ l/s}$ e considerando que cada dreno instalado irá captar este caudal, obtemos $1,8 \text{ l/s}$ por secção transversal de drenagem. Cada secção transversal é composta por 10 drenos.

Para o comprimento considerado, sensivelmente 503 m , irão ser construídas 59 secções transversais de drenagem do maciço.

Portanto:

$$Q = 0.18 * 10 * 59 = 106,2 \text{ l/s}$$

Admitindo uma secção rectangular de largura de $0,20\text{m}$, vai-se determinar a altura que a secção irá ter para este caudal.

$$\frac{106,2}{2} = (0,2 * h) \cdot 60 \cdot \left(\frac{0,20 * h}{0,20 + 2 * h} \right)^{2/3} \cdot 0.005^{1/2}$$

Obtendo-se uma altura para a caleira de drenagem de $0,35 \text{ m}$.