

Modelação numérica da escavação de um túnel através do método NATM

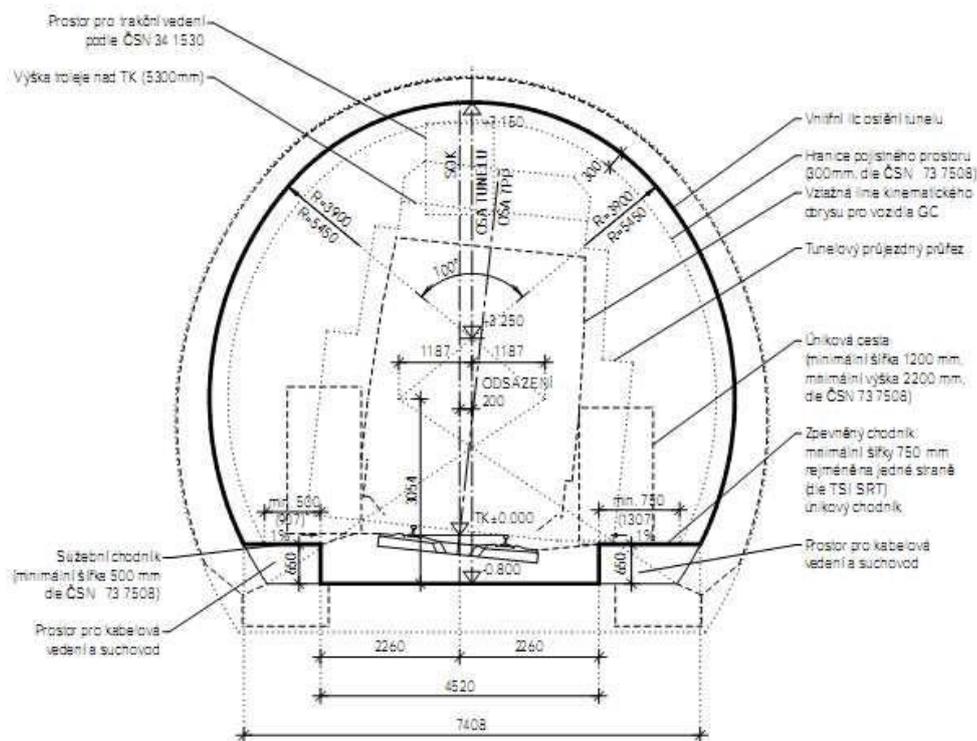
Programa: MEF - Túnel

Arquivo: Demo_manual_26.gmk

O objetivo deste manual é descrever a modelação numérica de uma linha férrea de uma faixa, utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Definição do problema

Desenvolva um modelo e avalie o revestimento primário de um túnel ferroviário com uma faixa, para velocidades entre 160 a 230 km/h. A secção transversal do túnel foi dimensionada com base na diretiva SZDC (Railway Infrastructure Administration, state organisation) respetiva, *ver imagem*.



Perfil de um túnel ferroviário com uma faixa, de acordo com a normativa SZDC

O túnel será executado através de um método de escavação de túneis convencional (New Austrian Tunnelling Method, Método de Escavação Sequencial), com a sequência da escavação a consistir num coroamento superior, uma base e num invertido (conhecida como sequência horizontal). A profundidade é de aproximadamente 14 m. O revestimento primário, com 200 mm de espessura, é realizado em concreto projetado C 20/25. O coroamento da escavação é suportado por roquetes hidraulicamente expandidos (HUIS, tipo WIBOLT EXP) com capacidade de 120 kN.

Assume-se, com base na investigação geotécnica realizada, que as camadas geológicas são paralelas à superfície do terreno. A *Tabela 1* mostra a composição do perfil geológico.

Table 1 – Parâmetros dos solos e rochas

| Solo, rocha (classificação) | Perfil [m] | γ [kN/m ³] | φ_{ef} [°] | c_{ef} [kPa] | ν [-] | E_{def} [MPa] | E [MPa] | γ_{sat} [kN/m ³] |
|-------------------------------------|---------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--|
| Areia siltosa (S4 / SM) | 0 – 3 | 19.5 | 29 | 10 | 0.3 | 10 | 30 | 22 |
| Cascalho siltoso (G4 / GM) | 3 – 5 | 19.5 | 33 | 8 | 0.3 | 70 | 210 | 22 |
| Ardósia muito degradada (R5) | 5 – 10 | 24 | 29 | 30 | 0.33 | 45 | 135 | 25 |
| Ardósia ligeiramente degradada (R3) | acima de 10 | 26 | 38 | 250 | 0.25 | 350 | 1050 | 26 |
| Região ancorada (R5) | – | 24 | 29 | 63 | 0.33 | 45 | 135 | 29 |

Resolução

Vamos utilizar o programa GEO5 MEF para analisar este problema. Neste texto, vamos descrever a resolução do problema passo-a-passo:

- Topologia: configuração e modelação do problema (elementos de contacto, modelação do revestimento)
- Modelação do processo construtivo: material do revestimento primário do túnel, fases de escavação
- Etapa de construção 1: tensão geostática primária do maciço rochoso
- Etapa de construção 2: modelação do coroamento da escavação, ativação da abertura não suportada da escavação
- Etapa de construção 3: suporte do coramento através de um revestimento primário em concreto
- Etapa de construção 4: melhoramento das características do concreto (coroamento)
- Etapa de construção 5: modelação da base de escavação do túnel, ativação da abertura não suportada da escavação

- Etapa de construção 6: suporte das paredes laterais da base através de um revestimento primário em concreto
- Etapa de construção 7: melhoramento das características do concreto (base)
- Resultados, conclusão: assentamento da superfície do terreno, deformação do maciço rochoso, distribuição das forças internas e deslocamento do revestimento primário do túnel, forças nas ancoragens

Nota: A modelação no programa GEO5 MEF consiste em duas partes. Na primeira parte, é necessário definir a dimensão do modelo numérico no modo topologia, definir interfaces entre solos e rochas, definir a geometria da estrutura do túnel através pontos e linhas e atribuí-los às interfaces respetivas do modelo (mais detalhes na Ajuda – F1).

Na segunda parte, define-se cada etapa de construção, com o objetivo de modelar a sequência construtiva real da estrutura subterrânea em análise, através da ativação, desativação ou alteração dos materiais em regiões predefinidas do modelo, ao adicionar ou remover elementos viga que representam elementos da estrutura (ex.: revestimento do túnel) ou ao alterar os seus parâmetros (material, dimensões). Vamos obter um modelo numérico que representa o comportamento real expectável da estrutura subterrânea e que será utilizado para dimensionar a estrutura do túnel.

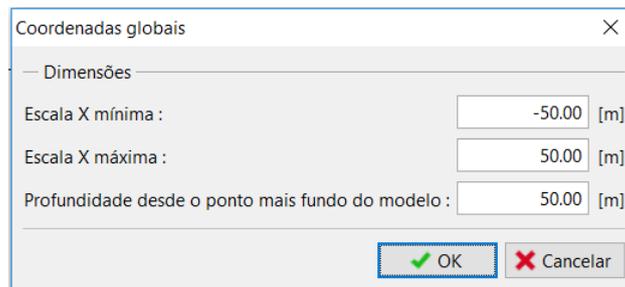
Topologia (Parte 1): definição das interfaces do problema (perfil) e parâmetros dos solos

Na janela “Configurações”, vamos manter a análise para a Etapa de Construção 1 para o estado da tensão geostática. Definir o tipo de análise como “Tensão”. Vamos, ainda, alterar o modo para “Túneis”, o que nos permite modelar a evolução da construção do revestimento primário do túnel de forma realista.

Janela “Configurações”

Nota: No mode “Túneis”, é possível utilizar o programa para modelar, por exemplo, escavações (modelação do efeito 3D da face da escavação utilizando o New Austrian Tunnelling Method), definir e analisar a degradação de vigas, a ação do efeito térmico em vigas e regiões, cargas atuantes em regiões devido à expansão de materiais e, por último, monitorização de resultados (mais detalhes na Ajuda – F1).

De seguida, vamos definir as dimensões do modelo numérico para o problema em análise de a interface da superfície do terreno. Vamos definir os limites do modelo como $\langle -50 \text{ m}; 50 \text{ m} \rangle$ e a profundidade máxima do perfil em análise como 50 m.



Caixa de diálogo “Coordenadas globais”

Nota: A interface do problema em análise, ou as coordenadas globais, devem ser suficientemente elevadas de modo a que o estado de tensão e as deformações no maciço rochoso, no local da estrutura em análise (ou das regiões de interesse), não sejam afetadas pelas condições nos limites do modelo. Na Ajuda, são apresentados e descritos com maior detalhe alguns valores de referência para os limites dos modelos em análise (mais detalhes na Ajuda – F1).

| Interface 1 | | Interface 2 | | Interface 3 | | Interface 4 | |
|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| x [m] | z [m] |
| -50,0 | 22,0 | -50,0 | 19,0 | -50,0 | 17,0 | -50,0 | 12,0 |
| 50,0 | 22,0 | 50,0 | 19,0 | 50,0 | 17,0 | 50,0 | 12,0 |

Lista de pontos para as interfaces entre solos e rochas

Na janela “Solos”, vamos definir os parâmetros das camadas de solo ou rocha, assim como os parâmetros das rochas para as regiões onde serão inseridos os roquetes (ver *nota*). Foi aplicado o modelo de Mohr-Coulomb para modelar este problema. Este modelo permite considerar as regiões onde ocorrem roturas locais ou globais (mais detalhes na Ajuda – F1).

Nota: Os roquetes são introduzidos no modelo numérico através de um método em que a região do maciço rochoso reforçado pelos roquetes, na vizinhança da abertura da escavação que corresponde ao comprimento dos roquetes, é substituída por rocha, com melhores parâmetros materiais. Normalmente, para estes casos, assume-se um aumento da coesão da rocha. A coesão global da rocha é aumentada pela ação dos roquetes, de acordo com:

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [kPa]}$$

onde: c_{h+s} coesão global aumentada da rocha devido à ação dos roquetes,
 c_h coesão original da rocha,
 c_s aumento da coesão devido à ação dos roquetes.

O aumento da coesão devido à ação dos roquetes é calculado de acordo com a relação seguinte:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2.058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1,5} = 33.0 \text{ kPa}$$

onde: N_u capacidade do roquete [kN],
 A_k região atribuída a um roquete [m²],
 φ_{ef} ângulo de atrito interno da rocha [°],
 γ_{kc} fator de confiança da ancoragem [-].

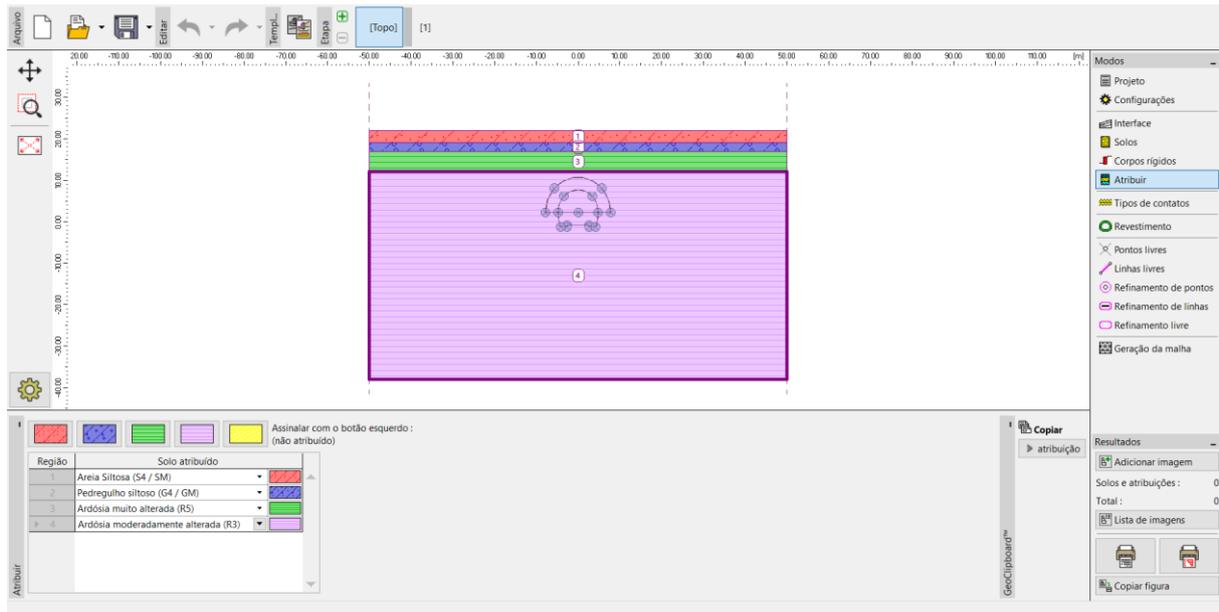
Neste problema, vamos considerar **10 roquetes HUIS com capacidade de 120 kN, espaçados 3.5 m entre si**. A resistência de cisalhamento resultante, ou coesão, da região reforçada por ancoragens corresponde a uma rocha tipo R5:

$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ kPa}$$

O módulo de elasticidade E [MPa] não foi determinado diretamente através da investigação geotécnica. Assim, o seu valor foi obtido a partir do módulo de deformação E_{def} [MPa], utilizando a relação geral: $E = 3 \cdot E_{def}$.

Vamos considerar um ângulo de dilatação ψ [°] nulo para todas as camadas de solo e rocha. Seguidamente, vamos atribuir os solos e rochas a cada região (ver figura).

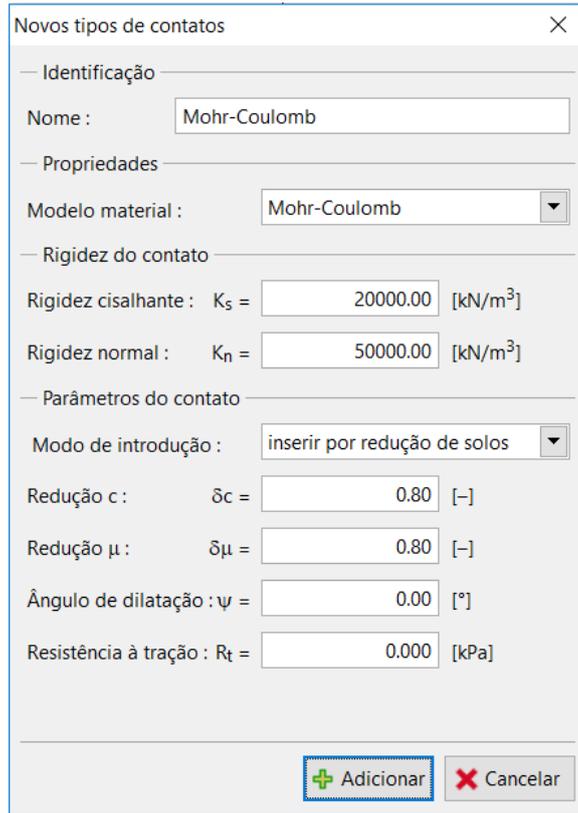
Caixa de diálogo "Adicionar novos solos"



Janela "Atribuir"

O passo seguinte é definir o tipo de elementos de contacto, que são introduzidos na interface entre o revestimento e o solo, ou rocha, na janela "Tipos de contactos". Vamos assumir os seguintes parâmetros de contacto a inserir na interface:

- Resistência de cisalhamento: $K_s = 20,000 \text{ kN/m}^3$,
- Rigidez normal: $K_n = 50,000 \text{ kN/m}^3$,
- Redução dos solos: $\delta c = \delta \mu = 0.8$.



Caixa de diálogo “Novos tipos de contacto”

Nota: Os elementos de contacto permitem a interação entre elementos existentes ao longo da interface entre o solo e a estrutura, ou entre diferentes tipos de solo, etc. A espessura de um elemento de contacto é nula. O elemento representa a relação entre as tensões de contacto e as variações relativas de deslocamentos ao longo dos contactos (mais detalhes na Ajuda – F1).

Neste caso, considerámos que os elementos de contacto se localizam na interface entre o revestimento primário e a rocha, isto é, considerámos a possibilidade do revestimento primário se mover ao longo da superfície da abertura da escavação.

Os elementos de contacto são, geralmente, introduzidos em solos com piores características; podem ser desprezados em rochas sem fendas (nos casos de estruturas de túneis). A forma de introdução de elementos de contacto está descrita com mais detalhe no problema do Capítulo 24 (Análise numérica para uma estrutura de suporte; mais detalhes em <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>). Os valores de referência para a rigidez K_s and K_n [kN/m³] são apresentados na Ajuda (F1).

Desta forma, conclui-se a definição base do problema (modelação de interfaces, parâmetros dos solos e tipos de contactos). Agora, vamos continuar com a modelação do revestimento primário do túnel e, seguidamente, com a definição da região reforçada com ancoragens.

Topologia (Parte 2): modelação do revestimento e região reforçada com roquetes

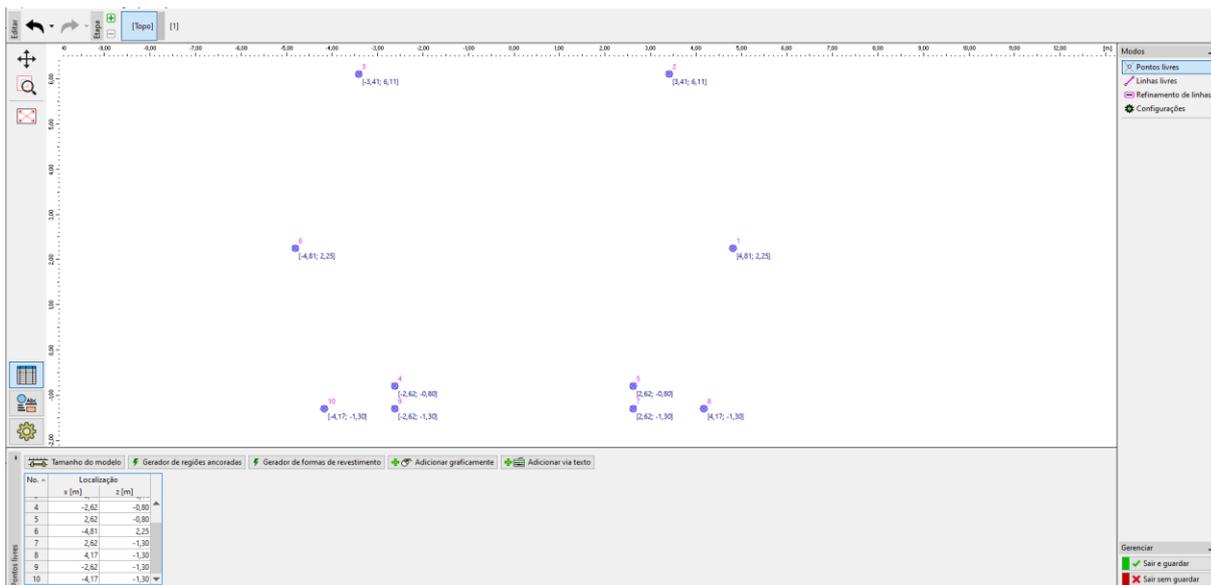
Vamos passar à janela “Revestimento” e, através do botão “Adicionar”, vamos definir os pontos do revestimento primário do túnel, a geometria da escavação e a sua localização dentro da região em análise. Vamos assumir que a espessura do revestimento é de 200 mm, considerando o tipo particular de estrutura (revestimento de um túnel ferroviário).

Nota: Podemos definir o revestimento do túnel a partir de cada ponto e linha, ou podemos defini-lo como um macro-elemento. A vantagem da segunda opção consiste em ser possível mover o revestimento em bloco, em qualquer direção (horizontal ou vertical), consoante se verificarem alterações no perfil geológico. Mais detalhes na Ajuda – F1.

A geometria transversal da escavação é definida no módulo “MEF – Revestimento”, através de dez pontos livres (ver *Tabela 2*), que estão ligados por linhas livres (ver *Tabela 3*).

Tabela 2 – Pontos livres da escavação (revestimento primário)

| Ponto No. | Coordenada | |
|-----------|------------|---------|
| | x [m] | y [m] |
| 1 | 4.81 | 2.25 |
| 2 | 3.41 | 6.11 |
| 3 | -3.41 | 6.11 |
| 4 | -2.62 | -0.80 |
| 5 | 2.62 | -0.80 |
| 6 | -4.81 | 2.25 |
| 7 | 2.62 | -1.30 |
| 8 | 4.17 | -1.30 |
| 9 | -2.62 | -1.30 |
| 10 | -4.17 | -1.30 |



Caixa de diálogo “Revestimento”

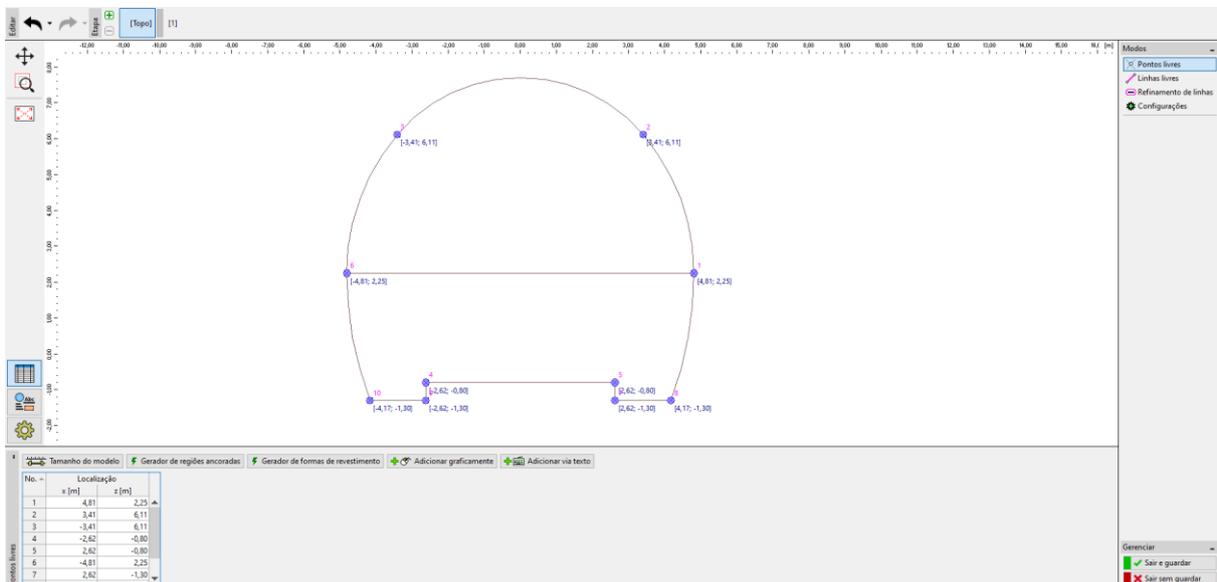
Nota: Os geradores da geometria das linhas geram os elementos de acordo com os parâmetros respetivos. Os elementos são, posteriormente, modelados de forma independente, sem qualquer possibilidade de alterar os seus parâmetros. Se os parâmetros de geração estiverem corretos, a forma gráfica dos elementos é visível quando estes estiverem a ser introduzidos (mais detalhes na Ajuda – F1).

Tabela 3 – Linhas livres da escavação (revestimento primário)

| Linha No. | Tipo de linha | Modo de introdução | Topologia das linhas |
|-----------|---------------|--------------------|---|
| 1 | arco | centro | Origem – ponto 1, fim – ponto 2 centro (-1.19; 2.25), orientação positiva |
| 2 | arco | centro | Origem – ponto 2, fim – ponto 3, centro (0.00; 3.25), orientação positiva |
| 3 | segmento | – | Origem – ponto 4, fim – ponto 5 |
| 4 | arco | centro | Origem – ponto 3, fim – ponto 6, centro (1.19; 2.25), orientação positiva |
| 5 | segmento | – | Origem – ponto 7, fim – ponto 8 |
| 6 | arco | centro | Origem – ponto 1, fim – ponto 8, centro (-5.39; 2.25), orientação positiva |

| | | | |
|----|----------|--------|---|
| 7 | segmento | – | Origem – ponto 5, fim – ponto 7 |
| 8 | segmento | – | Origem – ponto 9, fim – ponto 10 |
| 9 | arco | centro | Origem – ponto 10, fim – ponto 6, centro (5.39; 2.25), orientação positiva |
| 10 | segmento | – | Origem – ponto 4, fim – ponto 9 |
| 11 | segmento | – | Origem – ponto 6, fim – ponto 1 |

A imagem seguinte mostra os pontos livres da linha de contorno da escavação para o revestimento primário.



Módulo “MEF – Revestimento” – Linhas livres da escavação (com sequência horizontal)

O apoio do coroamento da escavação, com roquetes, é considerado durante a execução da estrutura subterrânea. Normalmente, este apoio é modelado na prática de engenharia como uma melhoria dos parâmetros da rocha, que se encontra na região em análise. Assim, também é necessário definir a região reforçada com roquetes – através de pontos livres (ver *Tabela 4*) e de linhas livres (ver *Tabela 5*).

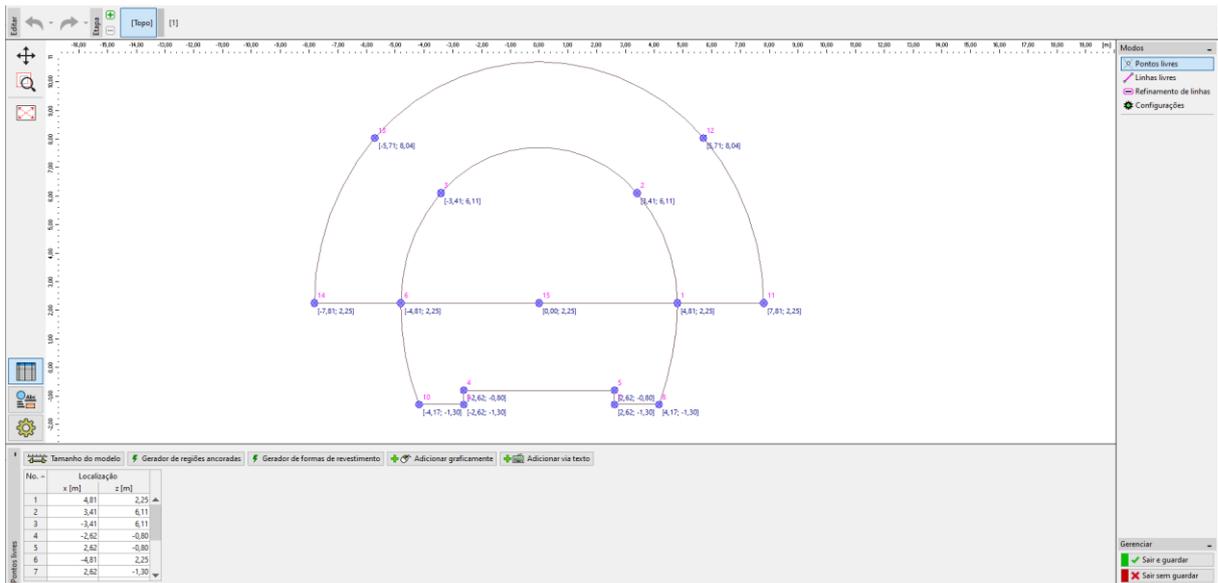
Tabela 4 – Pontos livres na vizinhança da região ancorada por roquetes expandidos hidráulicamente

| Ponto No. | Coordenada | |
|-----------|------------|---------|
| | x [m] | y [m] |
| 11 | 7.81 | 2.25 |
| 12 | 5.71 | 8.04 |
| 13 | -5.71 | 8.04 |
| 14 | -7.81 | 2.25 |

Tabela 5 – Linhas livres na vizinhança da região ancorada por roquetes expandidos hidráulicamente

| Linha No. | Tipo de linha | Modo de introdução | Topologia das linhas |
|-----------|---------------|--------------------|---|
| 12 | arco | raio | Origem – ponto 14, fim – ponto 13 Raio – 9.0 m, orientação negativa Ângulo – agudo |
| 13 | arco | raio | Origem – ponto 13, fim – ponto 12 Raio – 7.45 m, orientação negativa Ângulo – agudo |
| 14 | arco | raio | Origem – ponto 12, fim – ponto 11 Raio – 9.0 m, orientação negativa Ângulo – agudo |
| 15 | segmento | – | Origem – ponto 14, fim – ponto 6 |
| 16 | segmento | – | Origem – ponto 11, fim – ponto 1 |

De seguida, vamos adicionar um novo ponto livre, No. 15, com coordenadas $[0,0; 2,25]$, na janela “Revestimento” e vamos aumentar a densidade da malha de elementos finitos á sua volta (ver *Topologia – Parte 3*).



Pontos livres nas proximidades da região ancorada e pontos livres do revestimento primário

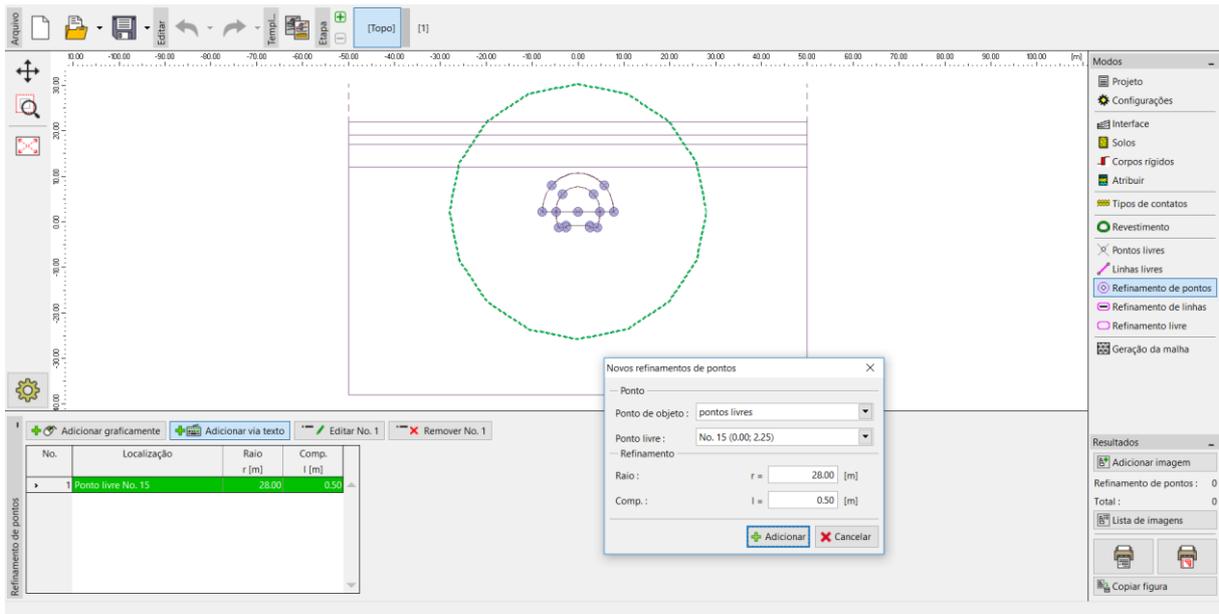
Agora, vamos examinar a geometria resultante para o revestimento primário do túnel, juntamente com a região reforçada por roquetes. Vamos localizar o revestimento dentro da região em análise, de acordo com a origem do sistema de coordenadas, isto é, ponto de coordenadas $[0,0]$, através da janela “Configurações”. Vamos concluir a introdução de pontos na janela “Revestimento” através do botão “Sair e guardar”.

A última parte da configuração da topologia da estrutura consiste na geração da malha de elementos finitos e no aumento da sua densidade.

Topologia (Parte 3): geração da malha de elementos finitos e aumento da sua densidade

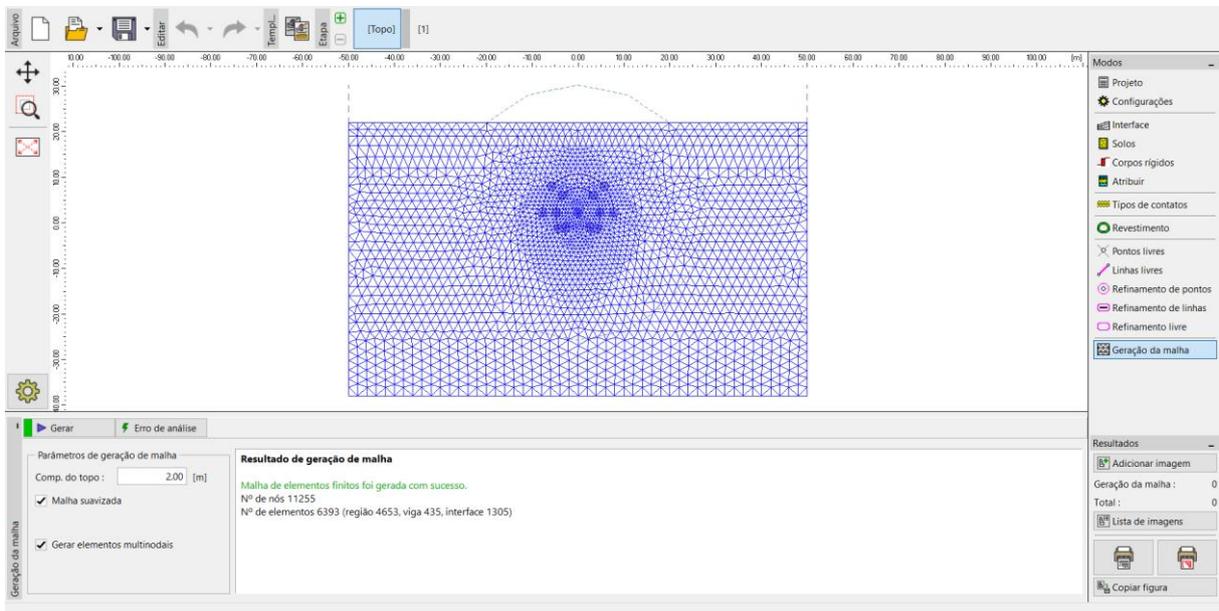
A malha de elementos finitos tem grande influência nos valores resultantes da análise. Antes de gerar a malha, vamos aumentar a densidade da zona escavada (em torno do ponto No. 15), com elementos de extremidades com comprimento $l = 0.5$ m e raio de alcance $r = 28$ m.

Nota: Através desta fase, vamos conseguir obter uma malha suficientemente densa na vizinhança da região desejada (escavação aberta). O processo de aumento da densidade de pontos ou linhas livres está descrito em detalhe no Capítulo 23. Análise do revestimento de um coletor (mais detalhes em <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).



Caixa de diálogo “Novos refinamentos de pontos”

Seguidamente, vamos continuar com a geração da malha de EF. Na janela “Geração da malha”, vamos definir os elementos das extremidades como 2.0 m e vamos seleccionar a opção “Malha suavizada”.



Janela “Geração da malha” – Refinamento dos pontos na vizinhança da região escavada (comprimento 0.5 m)

Notas acerca da modelação do processo construtivo:

Nesta parte do manual, vamos apresentar algumas notas importantes relacionadas com o processo construtivo – material do revestimento primário do túnel, sequência de escavação (diferentes fases da escavação). Esta informação é útil para a modelação numérica do nosso exemplo, dado que alguns dos dados a introduzir se repetem (ex.: escavações).

Note: As etapas de construção permitem considerar o processo de execução do túnel. De modo a ser possível definir cada etapa de construção, é possível conhecer o material do revestimento do túnel, a sequência de escavação e as condições hidro-geológicas expectáveis durante a escavação do túnel.

Vamos dimensionar o **revestimento primário** com 200 mm de espessura, em concreto projetado C 20/25. Neste modelo numérico, apenas vamos introduzir o concreto projetado e a influência da sua resistência, ou do módulo de elasticidade crescente no tempo (ver Tabela 6).

Tabela 6 – Valores do módulo de elasticidade para o concreto projetado (com variação ao longo do tempo)

| Maturação do concreto projetado | Módulo de elasticidade E_{cm} [MPa] | Módulo de cisalhamento G [MPa] |
|--|---|--|
| Concreto imaturo | 2 900 | 1 134 |
| Concreto maturo | 29 000 | 11 340 |

Nota: A escavação do túnel é modelada como um problema 2D, o que não permite considerar totalmente as alterações espaciais do estado de tensão do maciço rochoso, que se verificam durante a realização da escavação. Durante a operação da escavação, a abertura temporariamente não apoiada é suportada pela face da escavação em consola (arco de rocha longitudinal e transversal) e por parto da abertura anteriormente escavada já apoiada. Este comportamento pode ser considerado apenas em modelos 3D; num modelo 2D, o comportamento na direção da escavação apenas pode ser aproximado.

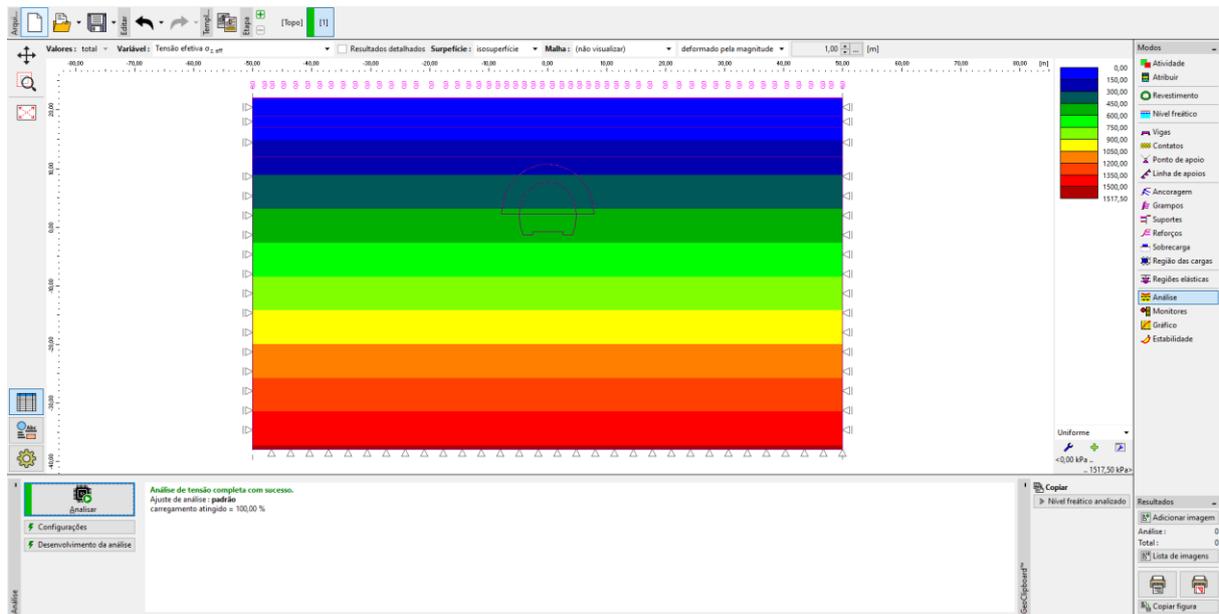
O método utilizado mais frequentemente na prática de engenharia (conhecido como método λ ou método β), assume que o estado de tensão primária do maciço, isto é, o estado de tensão original σ_0 atuante antes do início da escavação, na vizinhança da futura abertura, varia gradualmente no tempo, de acordo com a relação $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ (para o estado de tensão primária

$\beta = 1$) Se modelarmos uma variação na tensão primária, em 2 etapas de construção, a abertura escavada não apoiada é carregado pelo valor de $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ na primeira etapa e a carga restante de $\beta \cdot \sigma_0$ é considerada na segunda etapa.

No caso de um sistema de escavação sequencial, este procedimento deve ser aplicado separadamente a cada coroamento parcial. O valor do coeficiente β depende da geologia do maciço rochoso, do avanço realizado em cada etapa e da dimensão da escavação em perfil; é relativamente difícil de determinar. No programa GEO5 MEF, este método é representado pela “Escavação”. Estimámos o seu valor, para a modelação numérica, como $\beta = 0.6$ para um perfil de sentido único, tanto para o coroamento como para a base.

Etapa de construção 1: análise da tensão geostática primária

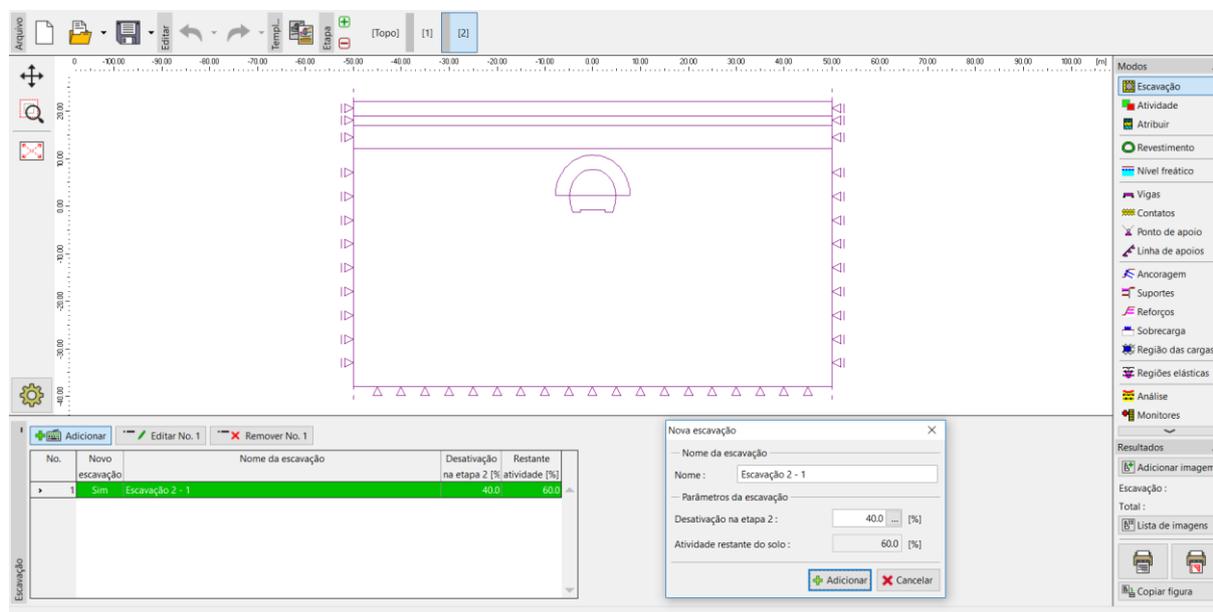
Após gerar a malha de EF, vamos passar à etapa de construção 1 e realizar a análise do estado de tensão geostática primária do maciço. Vamos manter a análise “Padrão” em todas as etapas de construção (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela “Análise” – Etapa de construção 1 (tensão geostática primária $\sigma_{z,eff}$)

Etapa de construção 2: coroamento da escavação, ativação da escavação não apoiada

O passo seguinte é adicionar a etapa de construção 2. De seguida, vamos modelar o coroamento da escavação na janela “Atividade” e vamos realizar a Escavação da região No. 6 (através do botão “Adicionar”).



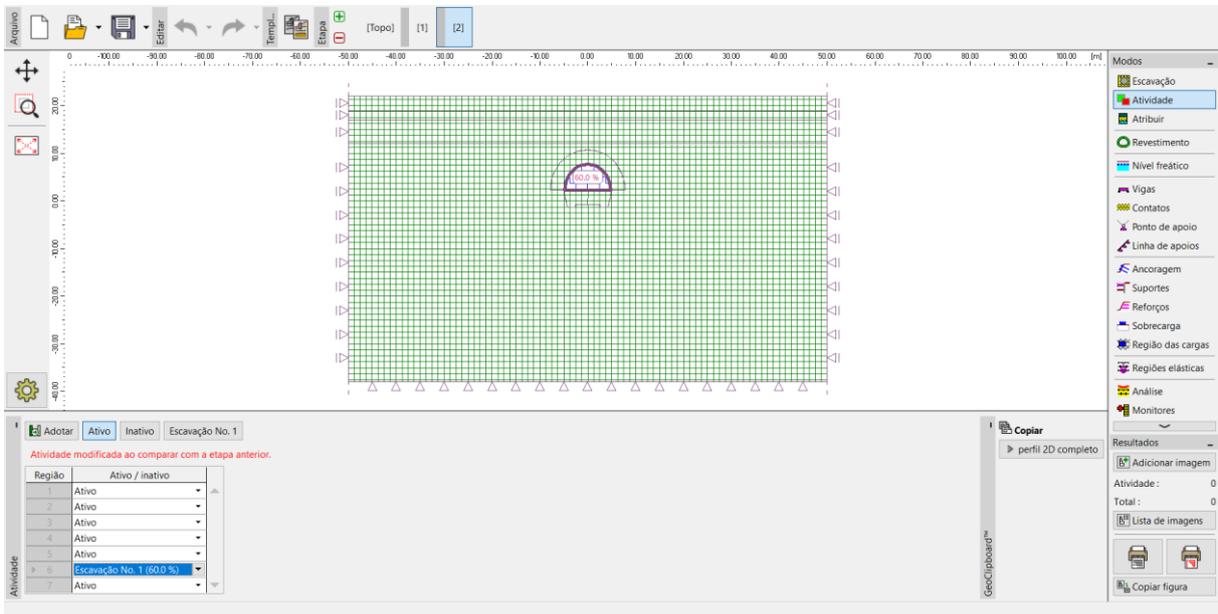
Caixa de diálogo “Nova escavação” – Etapa de construção 2

Nota: Na prática de engenharia, a sequência de escavação (diferentes fases de escavação) é definida pela percentagem de rocha desativada em relação à restante rocha ativa. Neste exemplo, consideramos as seguintes proporções de escavação para cada fase de escavação do túnel:

- *Escavação superior, ativação da abertura da escavação não apoiada: 40 % / 60 %,*
- *Apoio do vão superior com revestimento em concreto não maturado: 30 % / 30 %,*
- *Melhoria das propriedades materiais do concreto maturado (coroamento): 30 % / 0 %.*
- *Modelação da escavação da base do túnel, ativação da abertura escavada não suportada: 40 % / 60 %,*
- *Apoio das paredes laterais da base com revestimento primário em concreto não maturado: 30 % / 30 %,*
- *Melhoria das propriedades materiais do concreto maturado (base): 30 % / 0 %.*

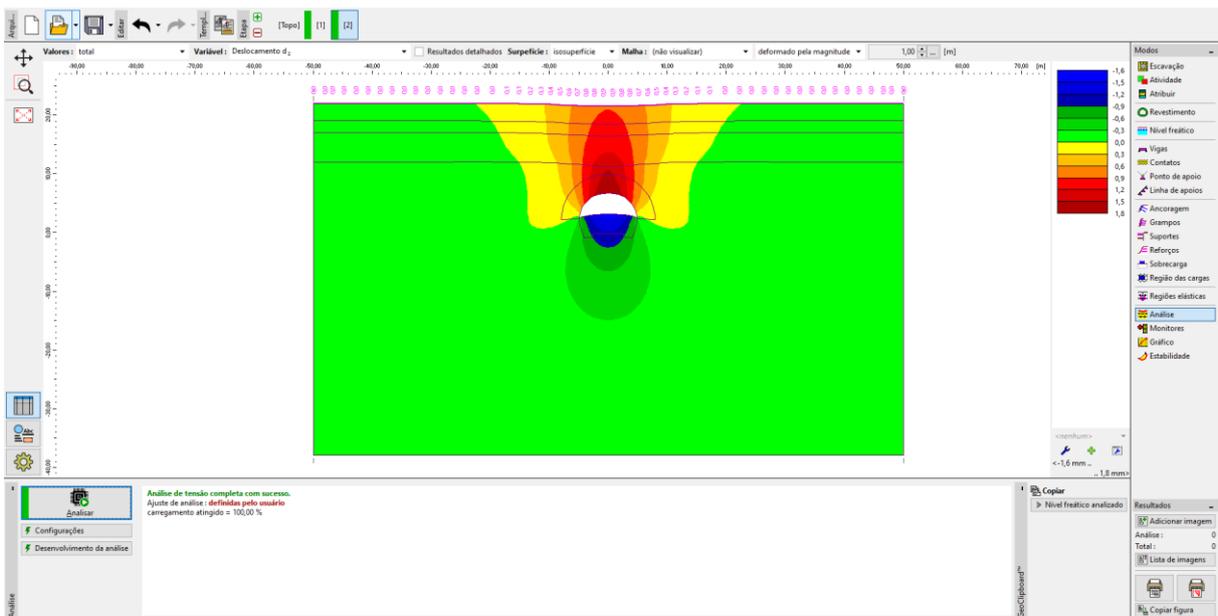
As percentagens acima mencionadas baseiam-se em anos de experiência e permitem resultados de confiança. No programa, é possível definir várias percentagem das Escavações, para cada etapa de construção (ex.: 25/75, 30/45, 30/15 ou 15/0), para o coroamento ou base da escavação.

Resumindo, é a ativação de uma parcela que define a carga atuante no coroamento não apoiado. Nesta etapa, desativamos 40 % do solo (ver *figura*).



Janela “Atividade” – Etapa de construção 2 (inatividade de 40 % do carregamento no coroamento da escavação)

Agora, vamos realizar a análise de avaliar os resultados para o deslocamento vertical d_z [mm]. Para compreender melhor o comportamento da escavação, vamos visualizar a malha deformada e o assentamento.



Janela “Análise” – Etapa de construção 2 (deslocamento vertical d_z com depressão)

Etapa de construção 3: apoio do vão superior com revestimento primário em concreto não maturado

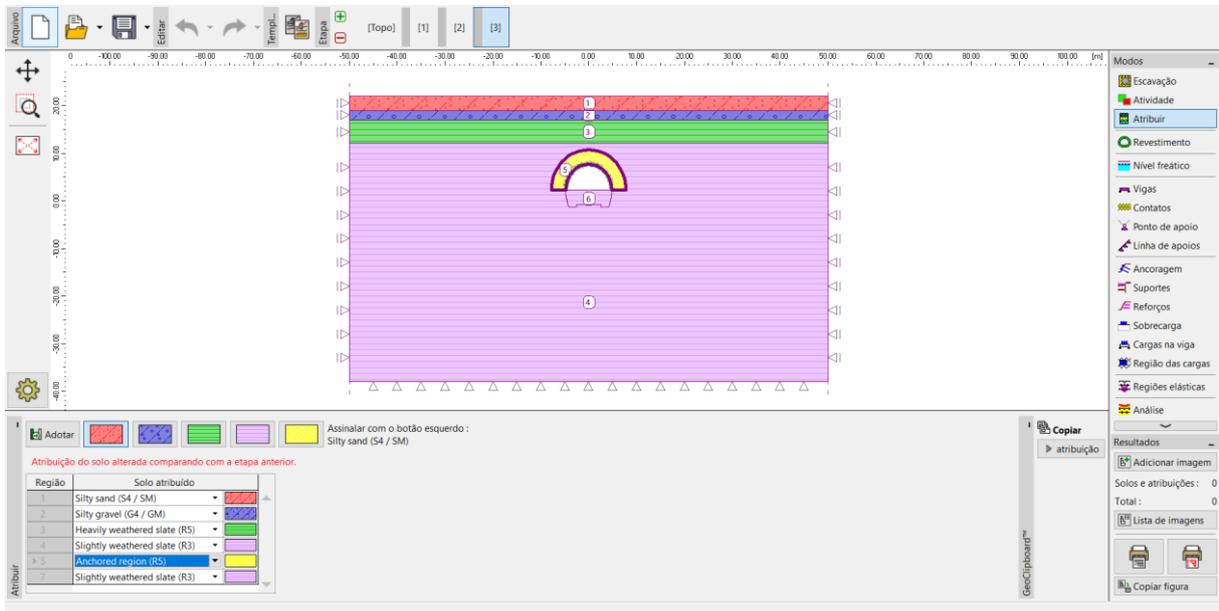
O passo seguinte é adicionar a etapa de construção 3. Primeiro, vamos modelar o apoio do vão superior da escavação com um revestimento primário com 200 mm de espessura em concreto imaturo, na janela “Vigas”.

| No. | Viga | | Posição | Apoio [m] | | Incluir peso próprio | Seção transversal / Degradação na etapa atual [%] | Material / Atual atividade da viga [%] | | Contatos | |
|-----|------|------------|-------------------|---------------|-------------|----------------------|---|---|---------|----------|--------------|
| | novo | modificado | | Ponto inicial | Ponto final | | | esquerda | direita | | |
| 1 | Sim | | Linha livre No. 1 | ○ | — | ✓ | 1.00 (b) x 0.20 (h) m | C 20/25; E = 29000.00 MPa; G = 1134/ (não inserido) | | | Mohr-Coulomb |
| 2 | Sim | | Linha livre No. 2 | — | — | ✓ | 1.00 (b) x 0.20 (h) m | C 20/25; E = 29000.00 MPa; G = 1134/ (não inserido) | | | Mohr-Coulomb |
| 3 | Sim | | Linha livre No. 4 | — | ○ | ✓ | 1.00 (b) x 0.20 (h) m | C 20/25; E = 29000.00 MPa; G = 1134/ (não inserido) | | | Mohr-Coulomb |

Introdução do coroamento com novas vigas – Etapa de construção 3 (concreto imaturo)

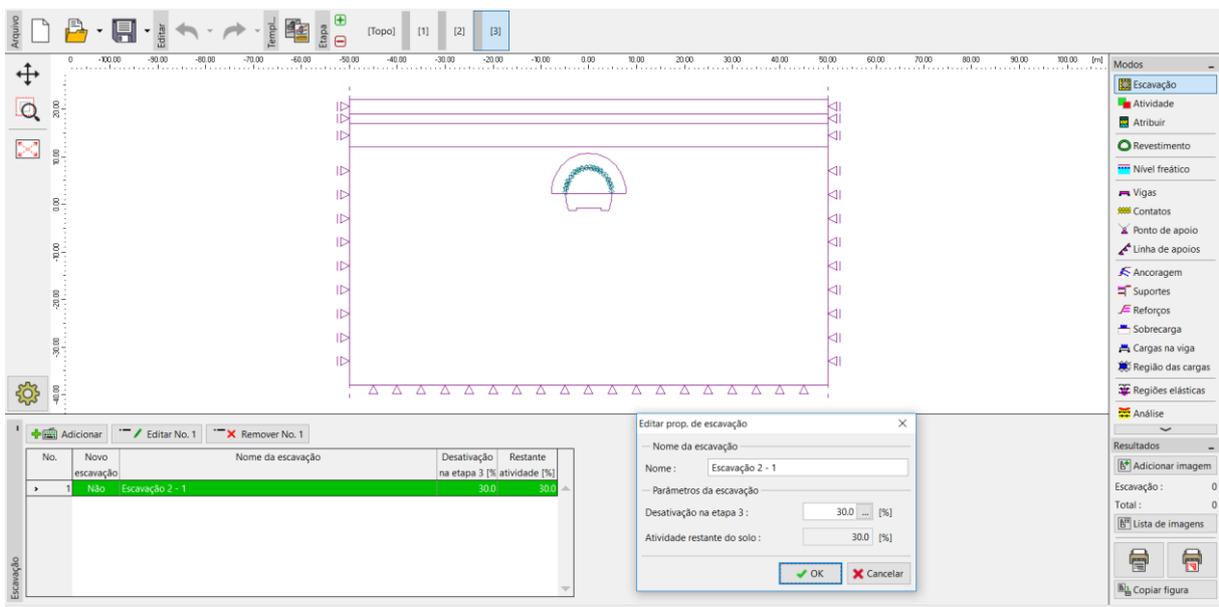
*Nota: Consideramos que as vigas têm um grau de liberdade, para a rotação, e ambas as extremidades, o que significa que os momentos fletores em ambas as extremidades são nulos. Em alguns casos, a capacidade das extremidades das vigas é modelada através de um tipo especial de **apoio**, que assegura a estabilidade e convergência da análise (mais detalhes na Ajuda – F1).*

Na janela “Atribuir”, vamos alterar a rocha na região No. 5 (para a opção “R5 ancorada”), na qual vamos inserir ancoragens com roquetes metálicos expandidos hidráulicamente (ver *imagem*).



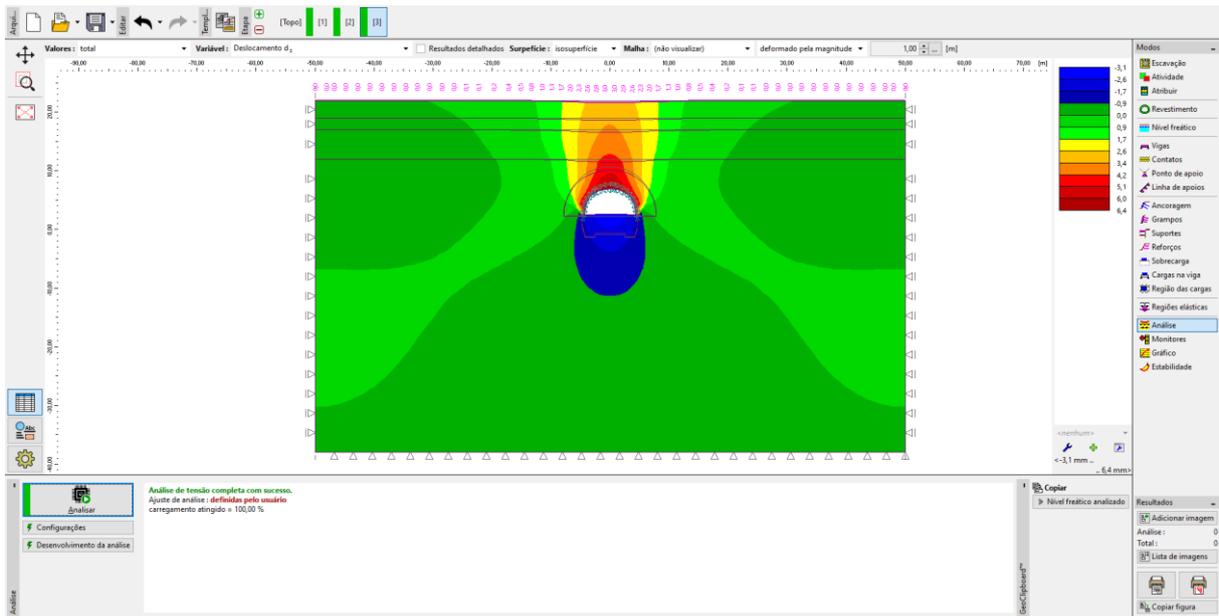
Janela “Atribuir” – Etapa de construção 3 (região ancorada com roquetes expandidos hidráulicamente)

Vamos, também, ativar os roquetes no maciço rochoso reforçado na vizinhança do coroamento da escavação e vamos editar as propriedades da escavação ao adicionar 30 % da carga (através do botão “Editar”).



Caixa de diálogo “Editar propriedades da escavação” – Etapa de construção 3

De seguida, vamos voltar a realizar a análise.



Janela "Análise" – Etapa de construção 3 (deslocamento vertical d_z com depressão)

Etapa de construção 4: melhoria das características materiais do concreto maduro (coroamento)

Na etapa de construção 4, vamos melhorar as características materiais do concreto já maduro do apoio do coroamento. Na caixa de diálogo “Editar propriedades da viga”, vamos selecionar a opção “reforço” e vamos definir os valores respetivos para os módulos de elasticidade. Vamos manter os restantes parâmetros inalterados.

Editar propriedades da viga

— Topologia

Posição : linha livre

Linha livre : Linha livre No. 1

— Parâmetros

Incluir peso próprio

— Nome

Nome : []

— Apoio

Ponto inicial : []

Ponto final : []

— Secção transv. e material

Parâmetros da viga na introdução da etapa 3
 parede retangular 1.00 (b) x 0.20 (h) m
 concreto C 20/25; E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 MPa; $\alpha = 0.000010$ 1/K; $\gamma = 25.00$ kN/m³

Parâmetros da viga na etapa anterior 3
 h = 0.20 m
 E = 29000.00 MPa
 G = 11340.00 MPa

Tipo de modificaçã: reforço

Altura da secção transv. : h = 0.20 [m]

Módulo de young : E = 29000.00 [MPa]

Módulo de deformação cisalhante : G = 11340.00 [MPa]

$I_y = 6.67E-04$ m⁴/m; A = 2.00E-01 m²/m; E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 MPa

— Contatos

Alterar parâmetros

Introduzir contato esquerdo introduzir contato direito

Tipo de contato : [] Tipo de contato : Mohr-Coulomb

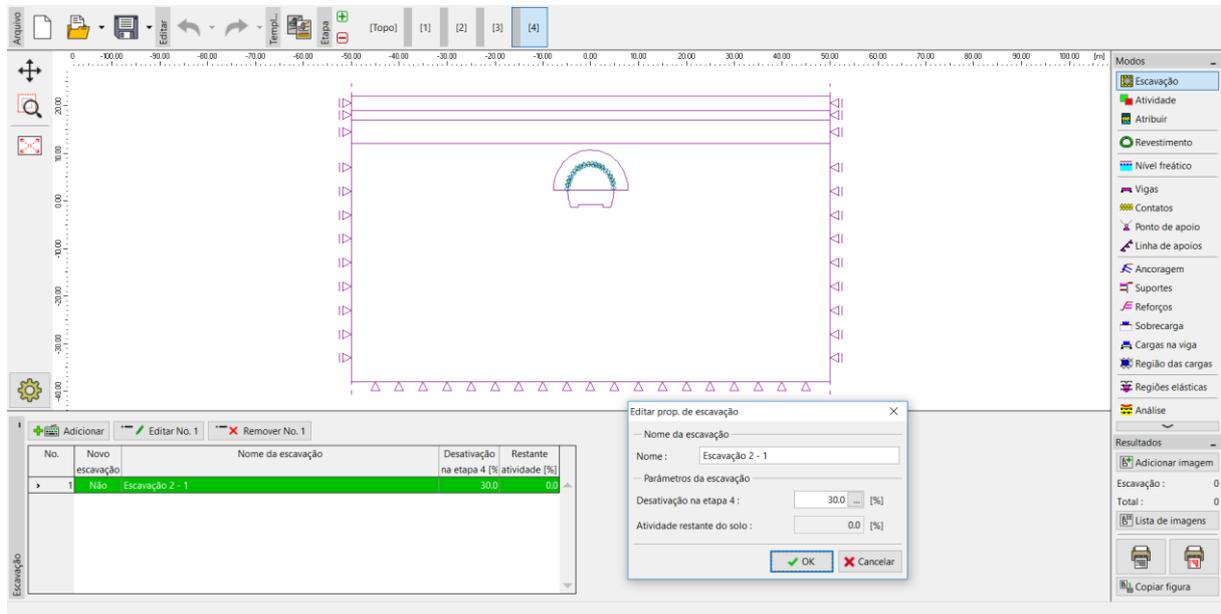
OK + [] OK [] Cancelar []

Caixa de diálogo “Editar propriedades da viga” – Etapa de construção 4 (viga No. 2)

| No. | Novo | Viga modificada | Posição | Apoio [m] | Incluir peso próprio | Secção transversal / Degradação na etapa atual [%] | Material / Atual atividade da viga [%] | Contatos esquerda | Contatos direita |
|-----|------|-----------------|-------------------|-----------|-------------------------------------|--|---|-------------------|------------------|
| 1 | Não | Sim | Linha livre No. 1 | [] | <input checked="" type="checkbox"/> | ↑ h = 0.20 m | ↑ E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 N (não inserido) | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| 2 | Não | Sim | Linha livre No. 2 | [] | <input checked="" type="checkbox"/> | ↑ h = 0.20 m | ↑ E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 N (não inserido) | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| 3 | Não | Sim | Linha livre No. 4 | [] | <input checked="" type="checkbox"/> | ↑ h = 0.20 m | ↑ E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 N (não inserido) | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |

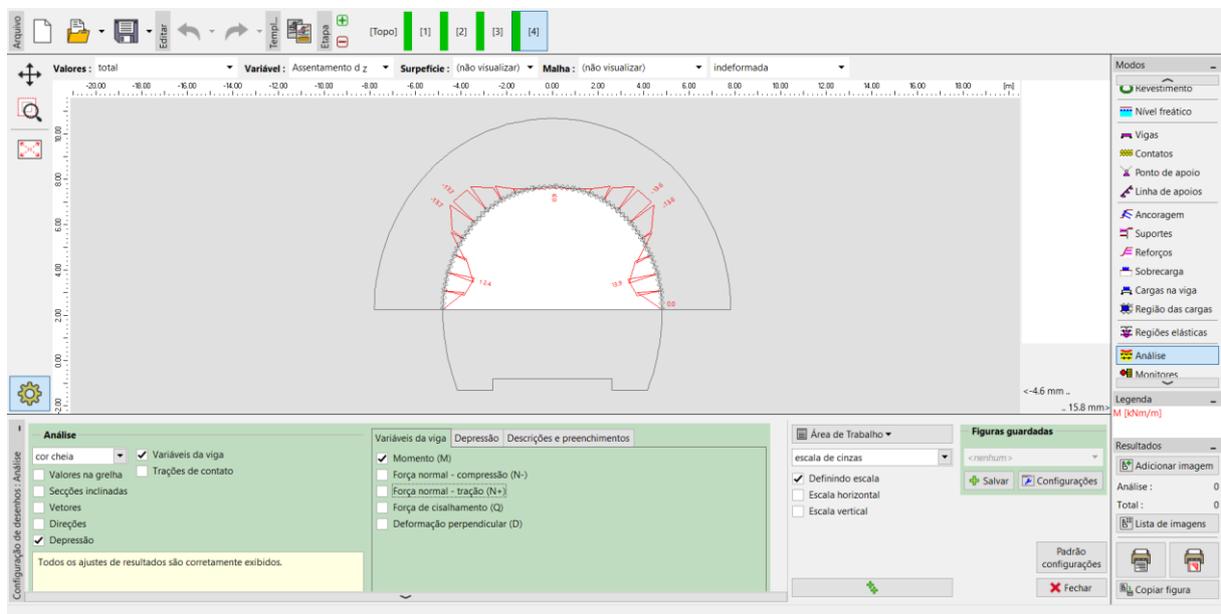
Modificação das propriedades do revestimento primário (coroamento) – Etapa de construção 4 (concreto maduro projetado)

Vamos ativar os restantes 30 % da carga atuante no maciço rochoso. O procedimento de edição das propriedades da escavação é semelhante ao realizado nas etapas de construção anteriores.



Caixa de diálogo “Editar propriedades da escavação” – Etapa de construção 4

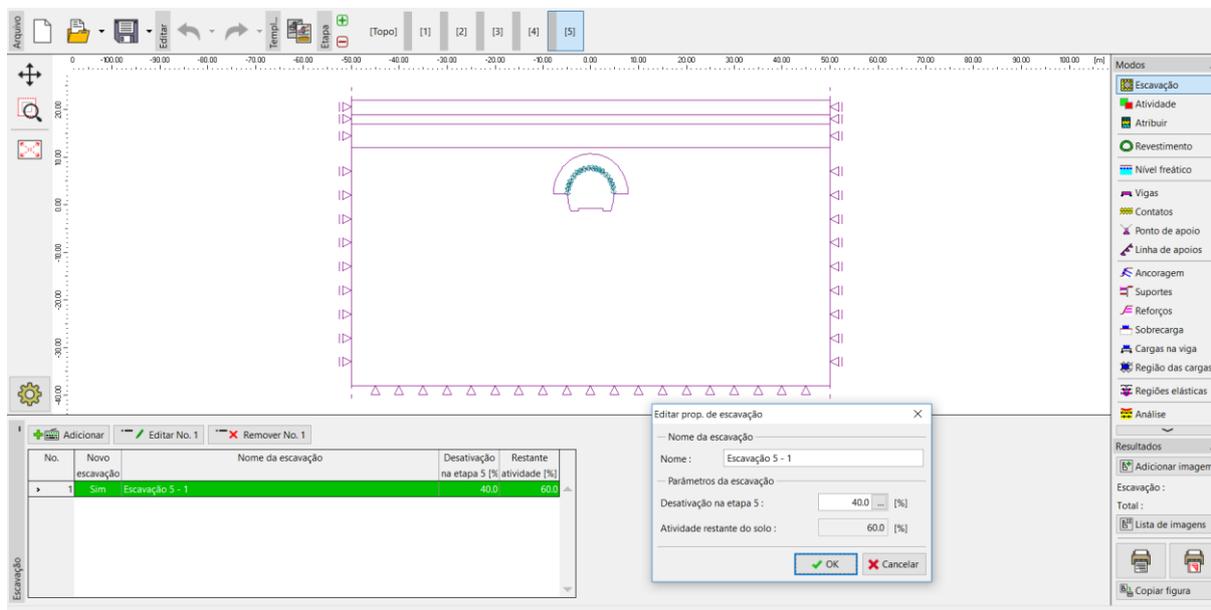
Seguidamente, vamos realizar a análise e avaliar o diagram de momentos fletores ao longo da linha de contorno do coroamento.



Janela “Análise” – Etapa de construção 4 (momento fletor M [kNm/m])

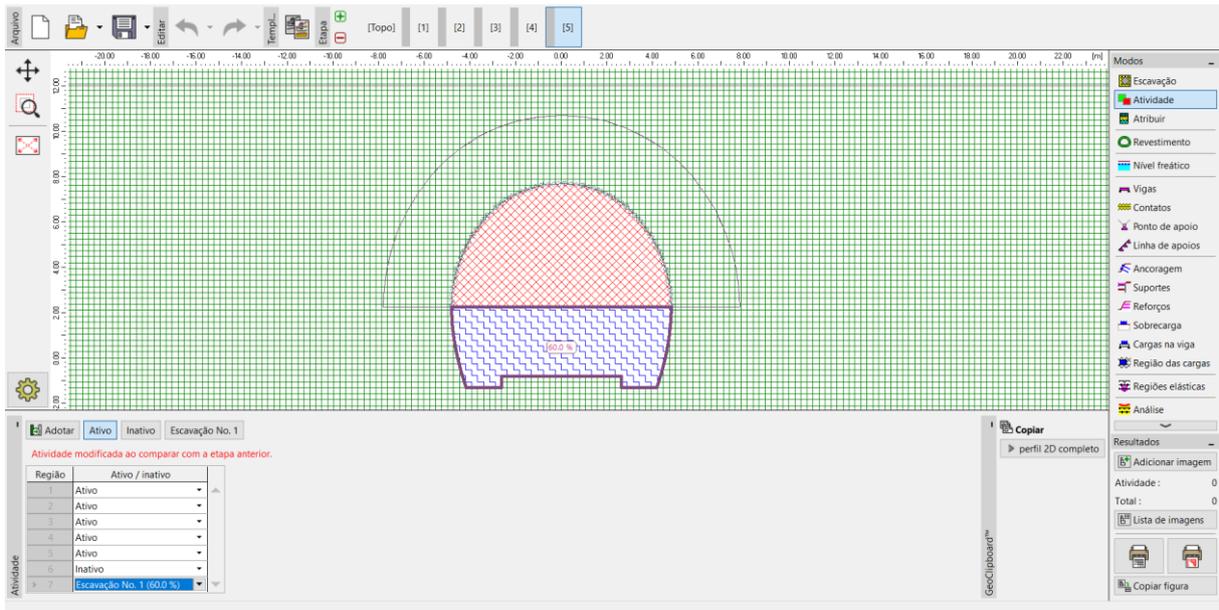
Etapa de construção 5: modelação da escavação da base do túnel. Ativação da abertura escavada não apoiada

O passo seguinte é adicionar a etapa de construção 5. Nesta etapa de construção vamos desativar o solo, ou ativar 40 % da carga. A ação do solo restante, ou o maciço na vizinhança da base da escavação do túnel, corresponde a 60 %.



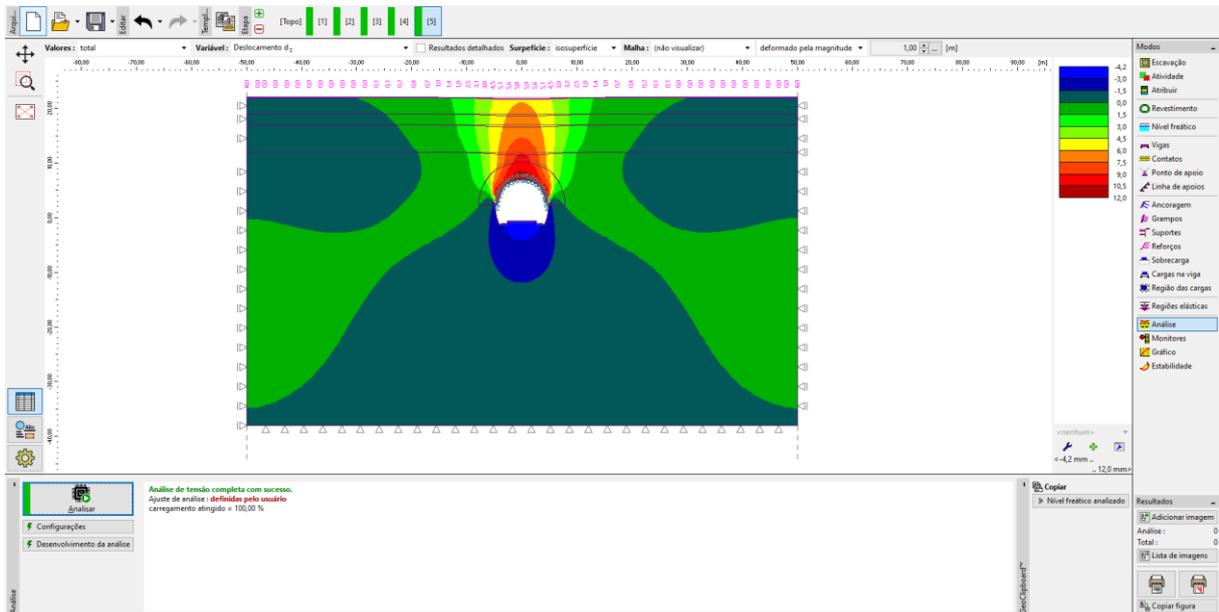
Caixa de diálogo – Etapa de construção 5

Nota: A modelação deste problema é semelhante nas etapas de construção seguintes. Primeiro, o revestimento primário da base do túnel é executado em concreto imaturo projetado. A parcela seguinte da carga é ativada de seguida. Na etapa seguinte, as características materiais do concreto projetado já maturado serão melhoradas e a parcela restante da carga será ativada.



Janela “Atividade” – Etapa de construção 5 (atividade de 40 % da carga na escavação da base do túnel)

Seguidamente, vamos realizar a análise.



Janela “Análise” – Etapa de construção 5 (deslocamento vertical d_z com depressão)

Etapa de construção 6: apoio das paredes laterais da base com revestimento primário em concreto imaturo projetado

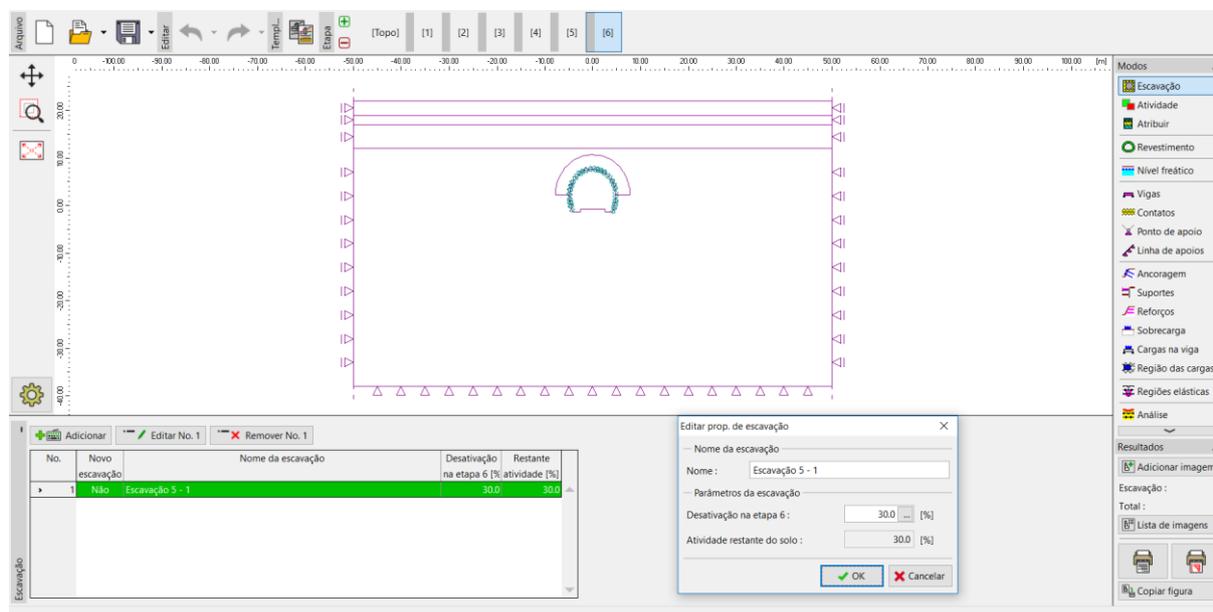
Na etapa de construção 6, vamos definir o suporte das paredes laterais da base com um revestimento primário em concreto imaturo projetado, com 200 mm de espessura. O coroamento do revestimento não será modificado nas etapas seguintes.

| No. | Viga | | Posição | Apoio (m) | | Incluir peso próprio | Secção transversal / Degradação na etapa atual [%] | Material / Atual atividade da viga [%] | Contatos | |
|-----|------|------------|-------------------|---------------|-------------|----------------------|--|--|----------------|----------------|
| | novo | modificado | | Ponto inicial | Ponto final | | | | esquerda | direita |
| 1 | Não | Não | Linha livre No. 1 | ○ | — | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 2 | Não | Não | Linha livre No. 2 | — | — | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 3 | Não | Não | Linha livre No. 4 | ○ | — | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 4 | Sim | Não | Linha livre No. 6 | ○ | — | ✓ | 1.00 (b) x 0.20 (h) m | C 20/25; E = 2900.00 MPa; G = 1134 | Mohr-Coulomb | (não inserido) |
| 5 | Sim | Não | Linha livre No. 9 | — | ○ | ✓ | 1.00 (b) x 0.20 (h) m | C 20/25; E = 2900.00 MPa; G = 1134 | Mohr-Coulomb | (não inserido) |

Introdução do revestimento primário da base do túnel através de novas vigas – Etapa de construção 6 (concreto imaturo)

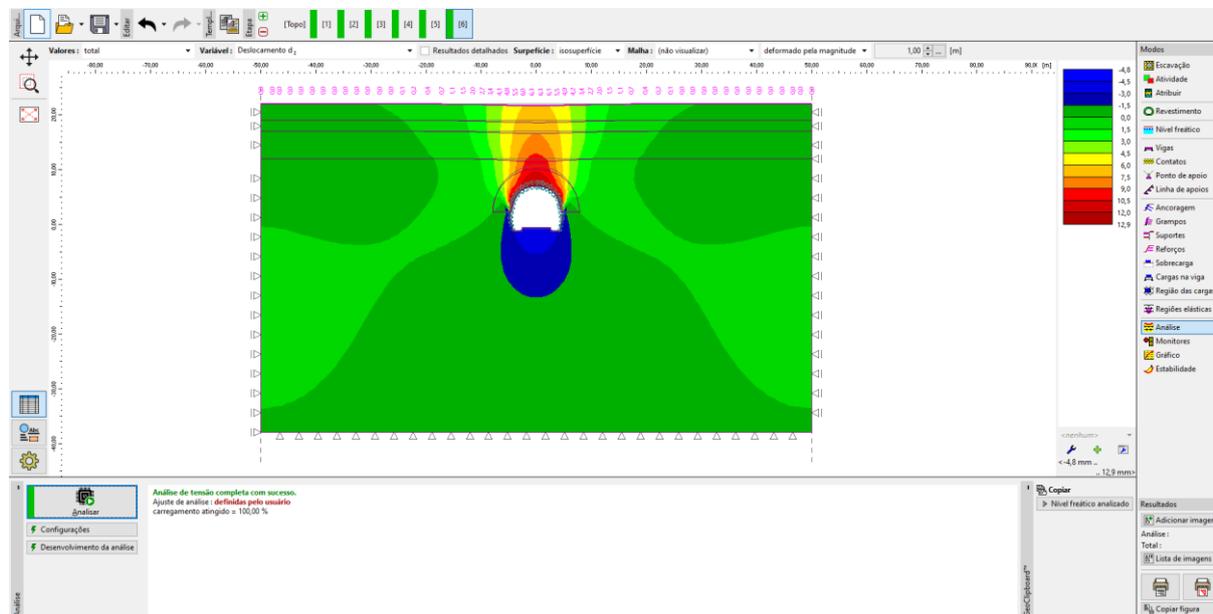
Nota: Voltamos a considerar que as vigas possuem um grau de liberdade rotacional em ambas as extremidades; o contacto entre o coroamento e a base não consegue transferir o carregamento através de um momento fletor (contrariamente às juntas totalmente contínuas). As dimensões da secção transversal da base são idênticas às das paredes do coroamento, isto é, $b = 1.0$ m, $h = 0.2$ m. Mas é necessário definir os contactos das novas vigas de forma inversa (mais detalhes na figura), uma vez que a orientação das vigas (paredes laterais da base) é negativa.

Nesta etapa de construção, vamos ativar os 30 % adicionais da carga induzida pelo maciço rochoso.



Caixa de diálogo "Editar propriedades da escavação" – Etapa de construção 6

Para finalizar esta etapa, vamos voltar a realizar a análise.



Janela "Análise" – Etapa de construção 6 (deslocamento vertical d_z com depressão)

Etapa de construção 7: melhoria das características materiais do concreto maduro (base)

Na última etapa de construção vamos melhorar as características materiais do concreto já maduro, que suporta a escavação da base do túnel.

| No. | Viga | | Posição | Apoio [m] | | Incluir peso próprio | Seção transversal / Degradação na etapa atual [%] | Material / Atual atividade da viga [%] | Contatos | |
|-----|------|------------|-------------------|---------------|-------------|----------------------|---|--|----------------|----------------|
| | novo | modificado | | Ponto inicial | Ponto final | | | | esquerda | direita |
| 1 | Não | Não | Linha livre No. 1 | ○ | — | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 2 | Não | Não | Linha livre No. 2 | — | — | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 3 | Não | Não | Linha livre No. 4 | — | ○ | ✓ | sem modificação | sem modificação | (não inserido) | Mohr-Coulomb |
| 4 | Não | Sim | Linha livre No. 6 | ○ | — | ✓ | ↑ h = 0.20 m | ↑ E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 N | Mohr-Coulomb | (não inserido) |
| 5 | Não | Sim | Linha livre No. 9 | — | ○ | ✓ | ↑ h = 0.20 m | ↑ E = 29000.00 MPa; G = 11340.00 N | Mohr-Coulomb | (não inserido) |

Modificação das propriedades do revestimento primário (base do túnel) – Etapa de construção 7 (concreto maduro projetado)

O processo de melhoria da capacidade das vigas é semelhante ao utilizado na etapa de construção 4. Vamos ativar os 30 % restantes da carga induzida pelo maciço rochoso. Desta forma, removemos todos os solos da zona de escavação e o carregamento passa a atuar totalmente no revestimento primário do túnel (incluindo as paredes do coroamento e da base). Seguidamente, vamos realizar a análise desta última etapa de construção.

| No. | Novo escavação | Nome da escavação | Desativação na etapa 7 [% atividade %] | Restante |
|-----|----------------|-------------------|--|----------|
| 1 | Não | Escavação 5 - 1 | 30,0 | 0,0 |

Editar prop. de escavação

Nome da escavação: Escavação 5 - 1

Parâmetros da escavação:

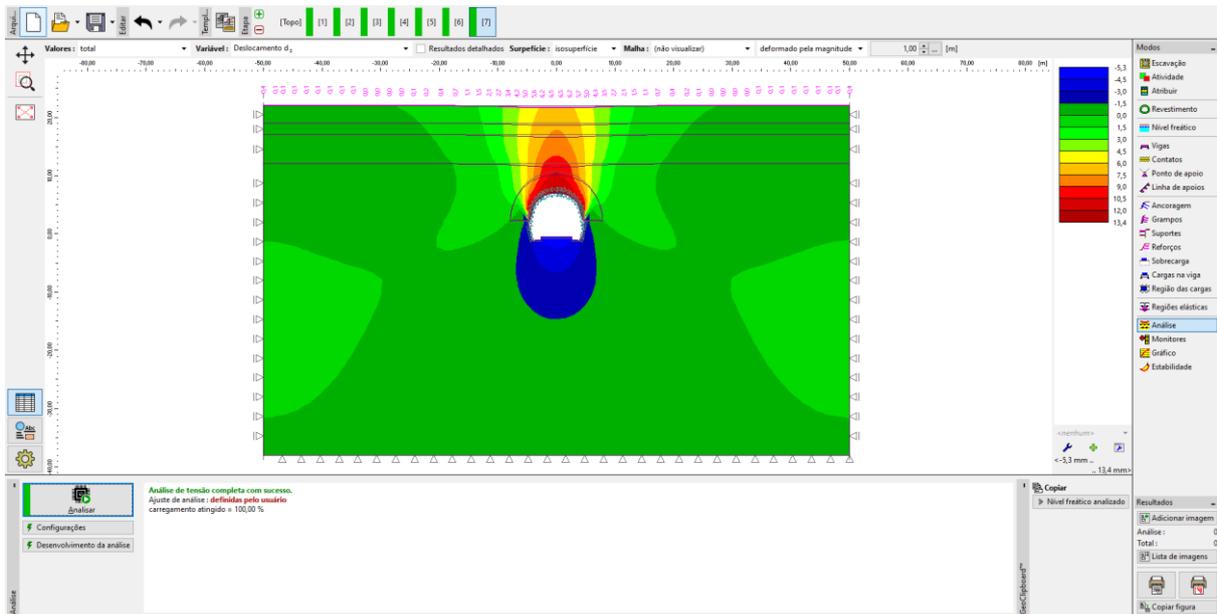
Desativação na etapa 7: 30,0 [%]

Atividade restante do solo: 0,0 [%]

OK Cancelar

Caixa de diálogo “Editar propriedades da escavação” – Etapa de construção 6

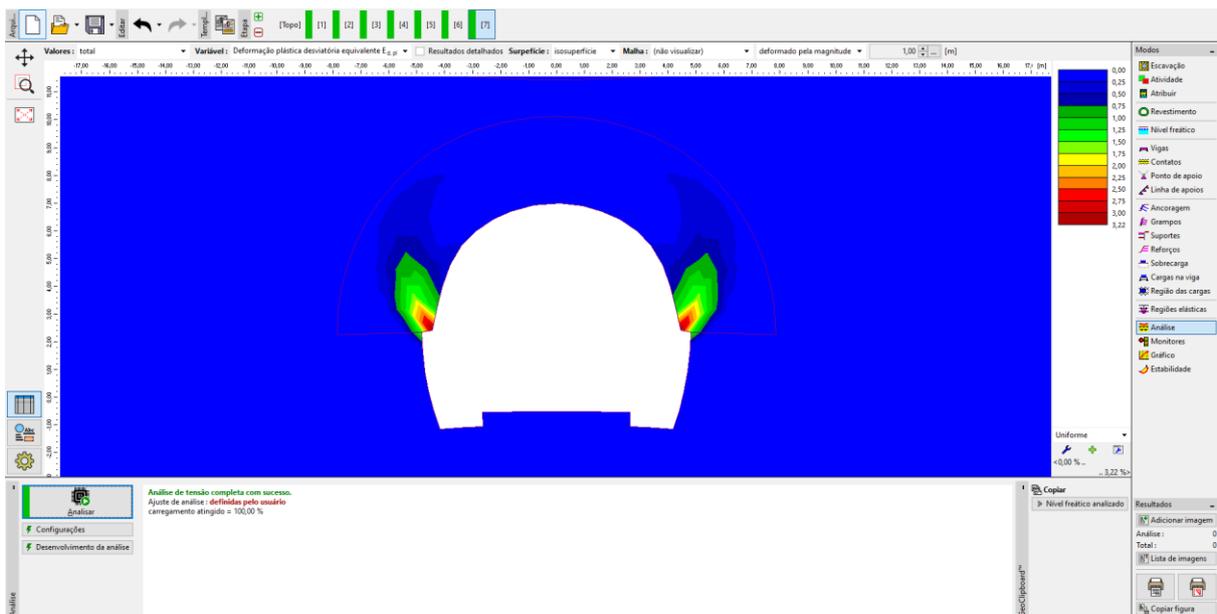
Agora, vamos voltar a realizar a análise para a última etapa de construção.



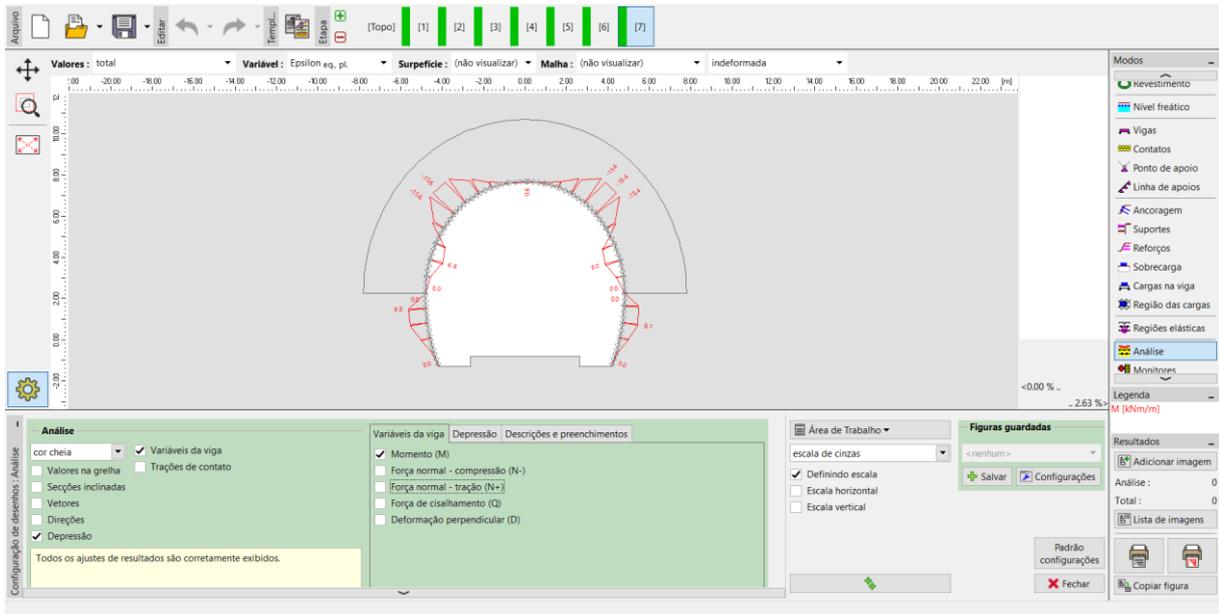
Janela “Análise” – Etapa de construção 7 (deslocamento vertical d_z com depressão)

Nesta etapa, também vamos visualizar as deformações plásticas equivalentes $\epsilon_{eq.,pl.}$ e os diagramas das forças internas para os momentos fletores e para as forças normais (botão “Visualizar” da secção “Distribuição”). Vamos anotar os resultados numa tabela.

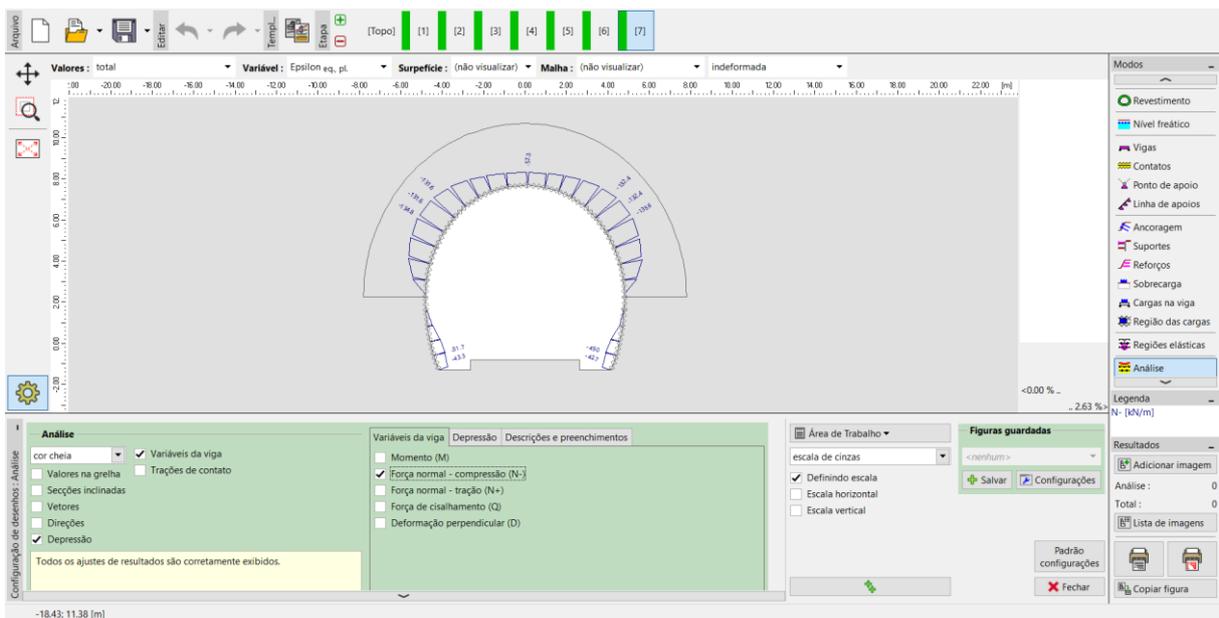
A partir da imagem seguinte é possível visualizar que as deformações plásticas equivalentes $\epsilon_{eq.,pl.}$ não são nulas, o que corresponde a um comportamento da estrutura de segundo o modelo não linear (Mohr – Coulomb).



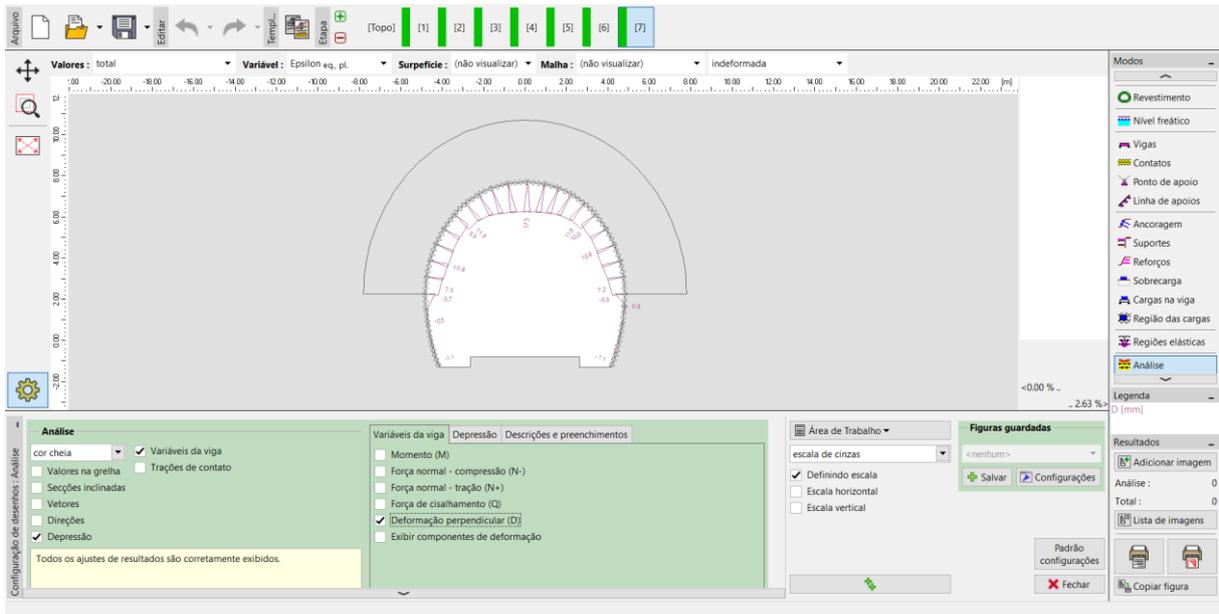
Janela “Análise” – Etapa de construção 7 (deformação plástica equivalente $\epsilon_{eq.,pl.}$ segundo o modelo de Mohr-Coulomb)



Janela "Análise" – Etapa de construção 7 (momento fletor M [kNm/m])



Janela "Análise" – Etapa de construção 7 (força normal – compressão N^- [kN/m])



Janela "Análise" – Etapa de construção 7 (deformação perpendicular)

Avaliação dos resultados:

A tabela seguinte mostra os valores extremos para as forças internas (momentos fletores, forças de cisalhamento e forças normais) atuantes nas vigas (revestimento primário do túnel), para a etapa de construção 7. Realizámos a análise para o modelo material plástico (Mohr – Coulomb), com a densidade dos elementos triangulares aumentada localmente.

| Modelo material | Etapa de construção 7 – Forças internas | | |
|-----------------|---|-------------|------------|
| | N [kN/m] | M [kNm/m] | Q [kN/m] |
| Mohr – Coulomb | - 135.6 | - 15.6 | - 14.1 |
| | + 14.0 | + 9.3 | + 14.9 |

Valores extremos das forças internas no revestimento primário – Etapa de construção 7

Esta tabela apresenta os valores globais para os deslocamentos verticais e horizontais d_z, d_x [mm] do revestimento primário do túnel, para cada etapa de construção.

| Etapa de construção | Valores globais do deslocamento d_z, d_x [mm] | | | |
|---------------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | $d_{z,min}$ | $d_{z,max}$ | $d_{x,min}$ | $d_{x,max}$ |
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | - 1.6 | + 1.8 | - 0.46 | + 0.46 |
| 3 | - 3.1 | + 6.4 | - 2.8 | + 2.8 |
| 4 | - 4.6 | + 11.9 | - 4.8 | + 4.9 |
| 5 | - 4.2 | + 12.0 | - 5.0 | + 5.1 |
| 6 | - 4.8 | + 12.9 | - 5.5 | + 5.5 |
| 7 | - 5.3 | + 13.4 | - 5.7 | + 5.8 |

Valores do deslocamento d_z, d_x do revestimento primário (extremos) – Todas as etapas de construção

Conclusão:

Neste problema, demonstrámos como modelar o revestimento primário de um túnel, através do Método dos Elementos Finitos. O túnel é executado de acordo com o NATM. A escavação do túnel é está dividida em diferentes fases. Ao remover rocha da zona escavada, o maciço de solo, ou rocha, sofre deformações, com os deslocamentos a serem direcionados para o interior da escavação.

O revestimento primário é reforçado por uma malha KARI (concreto armado com malha de aço soldado, de tirantes com 8 mm de diâmetro, com dimensões 150 x 150 mm) e com vigas em rede com 3 tirantes resistentes à carga. A introdução da malha KARI no modelo numérico MEF (homogeneização do concreto e armadura) é discutível; na maioria dos casos, apenas é considerada após separar a avaliação do revestimento.

O revestimento primário do túnel seria avaliado posteriormente para os valores extremos obtidos para as forças internas através de um software de análise estruturas (ex.: FIN EC – CONCRETE 2D), como uma combinação das tensões produzidas na secção por um momento fletor e por uma força normal (de acordo com os diagramas de esforços).

Nota: A análise de uma estrutura subterrânea sem a utilização de vigas e de elementos de contacto, segundo um modelo material linear (com comportamento elástico) está descrito no Capítulo 23. Análise do revestimento de um coletor (ver <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).