

Escavação de Túnel – Análise Sísmica Dinâmica

Programa: GEO5 MEF – Análise Sísmica

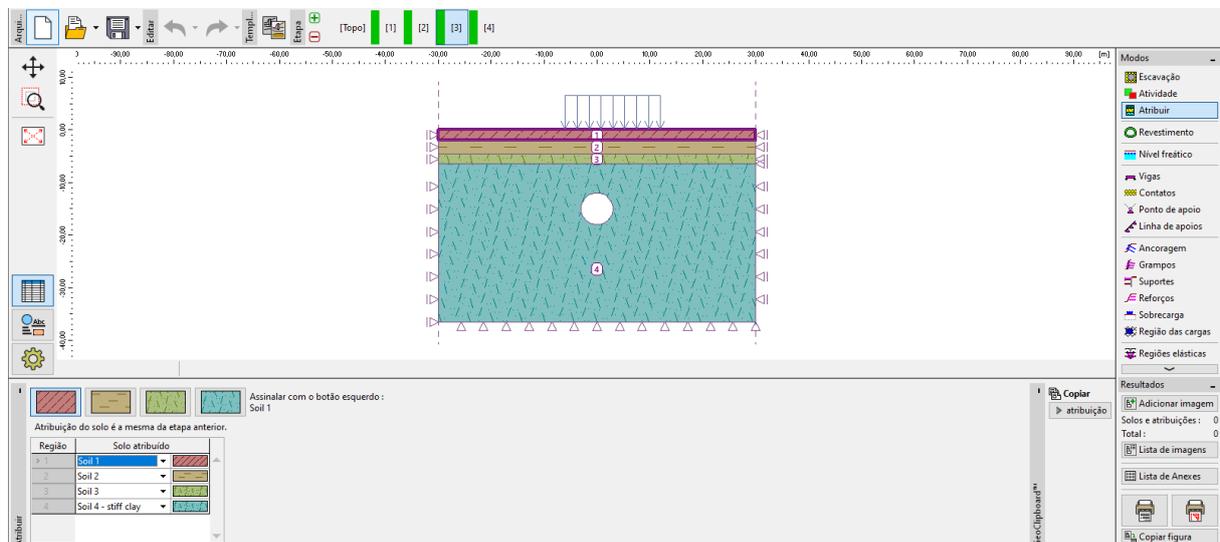
Arquivos: Demo_manual_48_init.gmk, Demo_manual_48.gmk

O módulo GEO5 MEF – Análise Sísmica foi concebido para realizar análises dinâmicas de estruturas geotécnicas solicitadas por movimentações do solo. A ação sísmica pode ser aplicada em qualquer etapa de construção de um modelo existente e o seu efeito é analisado como um problema dinâmico mecânico. O resultado da análise dinâmica são a evolução de deslocamentos no tempo, as deformações total e plástica e o campo de tensões. O programa calcula, ainda, a evolução de esforços internos nos elementos estruturais, tais como vigas, ancoragens, etc. Estes valores podem ser exibidos para qualquer instante da análise dinâmica.

Neste manual, mostramos um exemplo de uma análise dinâmica para um túnel.

Descrição do problema

Pretende-se saber qual a evolução da deformação do solo e a evolução de esforços internos no revestimento de um túnel durante a ocorrência de um sismo. O túnel está sujeito a um sismo na última etapa de construção, após todas as etapas de escavação estarem concluídas e o revestimento ser instalado. O modelo de elementos finitos para esta análise estática está guardado no ficheiro “Demo_manual_48_init.gmk”. O modelo contém a definição do perfil geológico, os parâmetros materiais, geometria, etapas de construção e outros dados necessários para a análise estática.



Perfil geológico e geometria do túnel

O sismo apresenta um pico de aceleração do solo de $a_g = 2 \text{ m/s}^2$. Assume-se que para cada camada do solo os valores do módulo de elasticidade dinâmica e rácio de amortecimento viscoso são os seguintes:

Solo	Módulo dinâmico E_{dyn} [MPa]	Rácio de amortecimento ξ [-]
Layer 1	200	0.05
Layer 2	300	0.05
Layer 3	1200	0.05
Layer 4	1965	0.05

A área principal do modelo (“Layer 4”) corresponde a uma camada de solo argiloso que se estende ao longo de dezenas de metros, abaixo da fronteira inferior do modelo MEF existente.

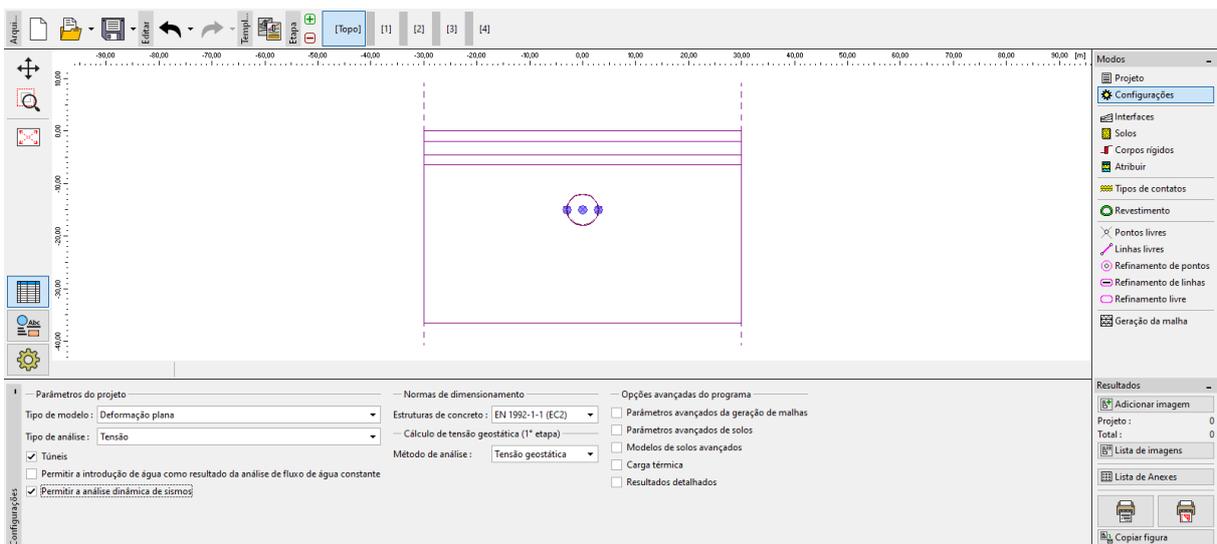
Além do modelo de elementos finitos existente, este manual tem como base o “Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos”. Esta Norma de dimensionamento especifica os tipos de solo A – E, S_1 e S_2 e o espectro de resposta elástica correspondente. O GEO5 MEF – Análise Sísmica permite gerar um espectro de resposta com um acelerograma compatível, que por sua vez permitem a análise dinâmica.

Análise

Começamos com o modelo de elementos finitos existente para a análise dinâmica de um sismo, abrindo o ficheiro “Demo_manual_48_init.gmk” e guardando-o como uma cópia de trabalho “Demo_manual_48.gmk”.

Ativação da análise sísmica dinâmica

A análise dinâmica de um sismo fica disponível ao selecionar a opção correspondente em [Topo], *Configurações*.



Janela Configurações – ativar a análise dinâmica de um sismo

Com esta opção selecionada, o programa solicita a introdução de parâmetros materiais adicionais, para a análise dinâmica. Isto permite que a análise dinâmica seja executada em qualquer etapa de construção.

Parâmetros materiais para a análise dinâmica

O passo seguinte na preparação do modelo é definir os parâmetros materiais dinâmicos para cada solo. Estes parâmetros são definidos na janela [Topo], Solos. Na janela para edição dos parâmetros do solo, na secção *Sismo*, introduzimos:

- *O módulo dinâmico de elasticidade* – corresponde ao módulo de Young para pequenas deformações do solo.
- *Tipo de amortecimento* – podemos escolher entre definir o rácio de amortecimento proporcional ξ ou inserir diretamente os parâmetros de Rayleigh α e β . Estes parâmetros estão explicados no manual “GEO5 - FEM - Earthquake - Theoretical Guide”, disponível em <https://www.finesoftware.eu/user-guides/>. O valor comum para o rácio de amortecimento em aplicações geotécnicas é $\xi = 5\%$.

O módulo dinâmico e de amortecimento são necessárias e devem ser definidas na janela com as propriedades do solo

De seguida, definimos os valores do módulo dinâmico e do rácio de amortecimento de acordo com a tabela anterior. Os materiais estão agora definidos e podemos continuar com as configurações dos parâmetros sísmicos para a etapa de construção pretendida.

Ativar a análise sísmica para a etapa pretendida

Para executar a análise dinâmica numa etapa definida, deve-se seleccionar a opção *Analisar sismo* na janela *Sismo*. Ao seleccionar esta opção, o programa executa a seguinte sequência de análises:

1. Análise de tensão estática
2. Análise modal
3. Análise de campo livre
4. Análise dinâmica do efeito sísmico

Podemos especificar a análise estática (adicionar sobrecargas, ativar ou desativar regiões, instalar elementos estruturais, etc.). Posteriormente, a análise dinâmica parte de um estado de equilíbrio, no final da análise estática.

O nosso modelo apresenta quatro etapas de construção: 1. Cálculo de tensões geostáticas, 2. Sobrecargas no terreno, 3. Escavação parcial da secção transversal do túnel, 4. Instalação do revestimento e conclusão da escavação.

Assim, a quarta etapa corresponde à conclusão da construção. Seria possível realizar a análise sísmica nesta etapa mas, dado que é boa prática simplificar as etapas de construção, adicionamos uma outra etapa (a quinta), onde vamos definir o sismo. Dado que não existem carregamentos adicionais a atuar na análise estática para esta etapa, o seu resultado será idêntico ao resultado da etapa anterior.

Condições de fronteira na base do modelo

Nesta quinta etapa, na janela *Sismo*, vamos definir as condições de fronteira na base do modelo. As opções disponíveis são:

- Condições de fronteira *fixas*
- Condições de fronteira *absorventes*

As *condições de fronteira fixas* são utilizadas quando a base inferior do modelo representa uma interface entre um solo relativamente mole com um material rígido, por exemplo um solo acima do *bedrock*. Estas condições de fronteira refletem as ondas que se propagam com direção descendente de volta para o modelo.

As *condições de fronteira absorventes* correspondem a uma situação onde não existe nenhuma interface entre materiais na fronteira inferior e o material atribuído à região inferior estende-se para cotas inferiores à região do modelo. Assumindo que o material desta camada inferior apenas se deforma elasticamente, estas condições de fronteira amortecem completamente as ondas, simulando que estas atravessam a fronteira inferior livremente e que se continuam a propagar no sentido descendente, para fora da região do modelo.

Dado que a camada argilosa do solo na camada 4 do nosso modelo se estende vários metros abaixo do modelo e que, conseqüentemente, não existe uma interface entre materiais na fronteira inferior, vamos selecionar a opção condições de fronteira *absorventes*.

Direção do acelerograma

A evolução do sismo é definida através de uma lista de instantes no tempo e acelerações correspondentes (um acelerograma) da onda de propagação sísmica na fronteira inferior. O programa permite definir as componentes horizontais e/ou verticais do acelerograma. Um acelerograma horizontal para a fronteira inferior origina uma onda de propagação transversal (onda S). Um acelerograma vertical para a fronteira inferior origina uma onda de propagação vertical (onda P). Para simplificação, vamos apenas recorrer ao acelerograma horizontal, no nosso modelo.

Acelerograma artificial

O Eurocódigo 8 permite descrever o movimento sísmico através de acelerogramas gerados artificialmente. No entanto, estes acelerogramas devem ser gerados de forma a corresponder ao espectro de resposta pretendido. O Eurocódigo 8 define diferentes espectros de resposta elástica para diferentes tipos de solo (A-E).

Assim, primeiro é necessário determinar o tipo de solo e, de seguida, os parâmetros do espectro de resposta correspondente. O programa gera um espectro e acelerograma compatíveis com estes parâmetros.

Tipos de solo

Os tipos de solo estão definidos no Eurocódigo 8. O solo do nosso modelo está de acordo com a descrição do tipo de solo B: “Depósitos de areias muito densas, cascalho, ou um argila muito rígida, com pelo menos várias dezenas de metros de espessura, caracterizado pelo aumento gradual de propriedades mecânicas em função da profundidade.” Para o tipo B, a Norma de dimensionamento define o alcance típico de uma onda de propagação transversal de velocidade média nos 30 metros superiores do perfil do solo. O intervalo está entre 360 m/s e 800 m/s.

A velocidade média da onda de propagação transversal nos 30 metros superiores é calculada de acordo com o Eurocódigo 8:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

onde h_i representa a espessura da i -ésima camada, medida em metros.

A velocidade da onda transversal na i -ésima camada é calculada através de:

$$v_i = \sqrt{\frac{G_{dyn,i}}{\rho_i}}$$

onde

$$G_{dyn,i} = \frac{E_{dyn,i}}{2(1 + \nu_i)}$$

O módulo de cisalhamento transversal, $\rho_i = \gamma_i/g$ representa a densidade, $E_{dyn,i}$ representa o módulo dinâmico de Young, ν_i representa o coeficiente de Poisson, γ_i representa o peso volúmico, e g representa a aceleração da gravidade.

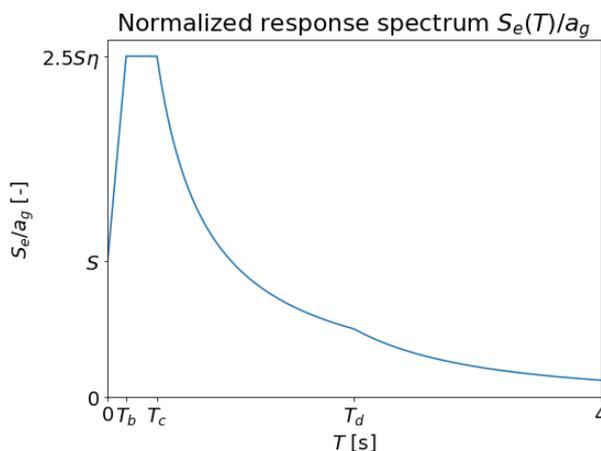
Cálculo da velocidade média de uma onda transversal

i	E [Mpa]	ν [-]	G [Mpa]	γ [kN/m ³]	ρ [kg/m ³]	v [m/s]	h [m]	h/v [s]
1	200	0.35	74.1	20	2000	192.5	2	0.0104
2	300	0.35	111.1	20	2000	235.7	2.5	0.0106
3	1200	0.3	461.5	21	2100	468.8	2	0.0043
4	1965	0.3	755.8	21	2100	599.9	23.5	0.0392
							sum(h_i/v_i) =	0.0644
							vs,30 =	465.6

A velocidade obtida para a onda transversal $v_{s,30} = 465.6$ m/s confirma que o solo é do tipo B.

Espectro de resposta elástica

O Eurocódigo 8 define o espectro de resposta da aceleração elástica do solo de acordo com os parâmetros listados para cada tipo de solo. Para solos do tipo B e Tipo* 1, a Norma define $S = 1.2$, $T_B = 0.15$ s, $T_C = 0.5$ s, $T_D = 2.0$ s. A figura seguinte apresenta o significado destes parâmetros:



Parâmetros do espectro de resposta elástica definidos no Eurocódigo 8

* O Eurocódigo 8 também faz a distinção entre dois tipos de espectros (Tipo 1 e Tipo 2). Para simplificação, neste exemplo vamos apenas considerar o Tipo 1.

Gerar o acelerograma

Se pretendermos gerar um acelerograma estacionário, isto é, um acelerograma sem os períodos da ascensão característica, movimento forte e decadência, devemos selecionar a opção *Estacionário*. Para o nosso caso, vamos assumir um acelerograma não estacionário, não selecionando esta opção.

No passo seguinte, vamos introduzir os parâmetros comuns ao acelerograma horizontal e vertical. Estes consistem em:

Duração do sismo t_s – medido em segundos. Corresponde à duração total do acelerograma Gerado, incluindo os períodos de ascensão característica, movimento forte e decadência.

Número de intervalos – corresponde ao número de instantes no tempo para os quais a aceleração é gerada. O GEO5 MEF a *Fast Fourier Transform* (FFT) no acelerograma, gerando um algoritmo, sendo recomendado utilizar 2^n intervalos, por exemplo: 256, 512, 1024, etc. Um número de intervalos razoável está na ordem das centenas de segundos.

Rácio de amortecimento proporcional ξ – este rácio de amortecimento está na definição do espectro de resposta elástica. É definido como um valor entre 0 e 1.

Fator de correção de amortecimento η – para o valor mais comum do rácio de amortecimento $\xi = 5\%$, o Eurocódigo 8 sugere o valor do fator de correção de amortecimento $\eta = 1$. Para valores diferentes, a Norma determina a fórmula $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)}$. O rácio de amortecimento ξ é definido em %.

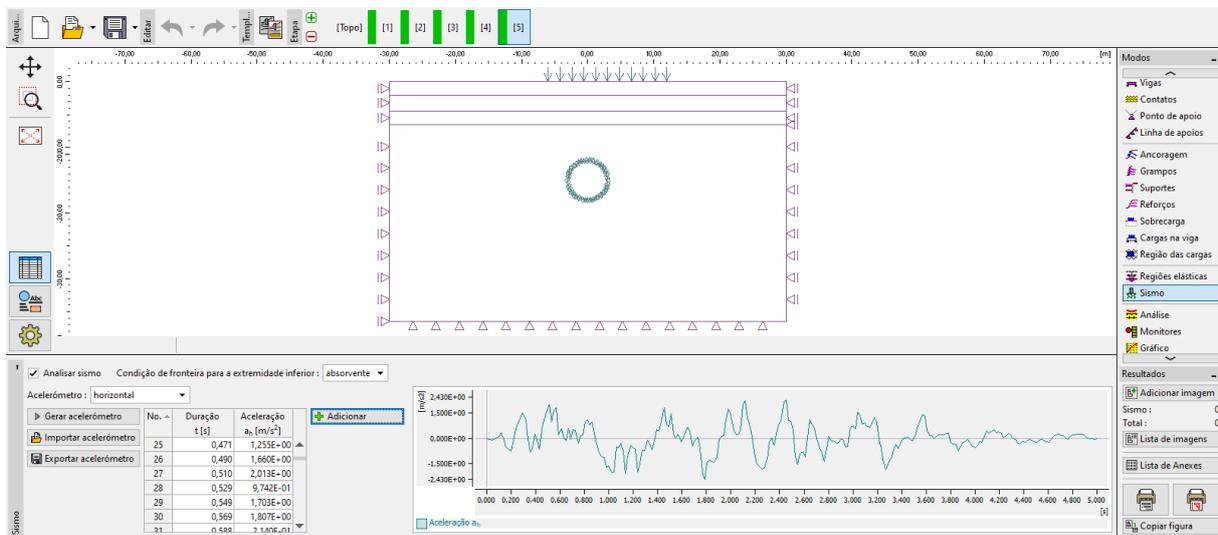
Alternativo – isto representa a base de um número pseudo-aleatório. Quando este valor é alterado, o programa gera diferentes acelerogramas com espectros de resposta elástica análogos. Esta opção é útil ao expôr o modelo a vários acelerogramas artificiais, tal como é imposto pelo Eurocódigo 8.

Janela para gerar o acelerograma com os valores dos intervalos do tempo e acelerações obtidas

De seguida, é necessário introduzir os parâmetros para o espectro de resposta elástico. Estes parâmetros são definidos de forma separada para o acelerograma horizontal e vertical. Os valores destes parâmetros estão definidos no Eurocódigo 8, para cada tipo de solo.

A parte final da janela serve para definir os parâmetros que definem a envoltória. O parâmetro ϵ_m determina o tempo $t = \epsilon_m t_s$ para o qual a envoltória atinge o seu máximo. O parâmetro η_m controla a intensidade das acelerações no final do acelerograma. Corresponde a um rácio entre o valor da envoltória no final do acelerograma no intervalo t_s e o máximo no intervalo $t = \epsilon_m t_s$.

Após definir todos os parâmetros, vamos gerar o acelerograma. Ao clicar em *OK*, a janela fecha e o acelerograma Gerado é exibido na janela *Sismo*.



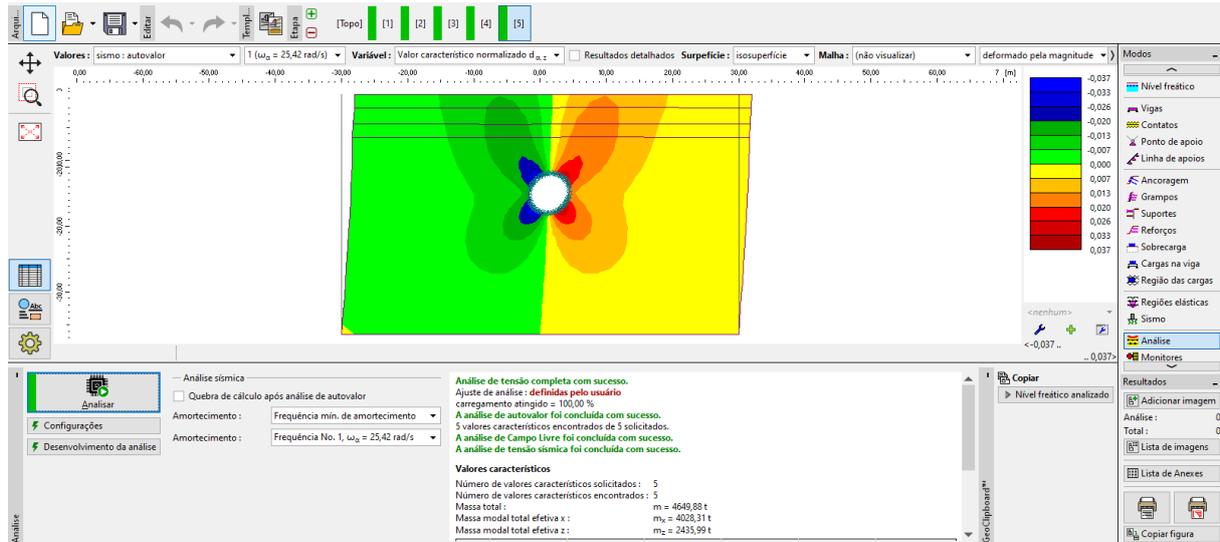
Janela *Sismo* com o acelerograma gerado

Análise dos valores próprios e frequências próprias

O amortecimento do material ficou definido através do rácio de amortecimento ξ e, assim, é também necessário especificar qual a frequência (ou par de frequências) que será amortecida por este valor. No GEO5 MEF – Análise Sísmica estas frequências podem ser definidas a partir de frequências próprias do modelo em particular. As frequências próprias são computadas antes da análise dinâmica ser executada.

Vamos assumir que a frequência com menor amortecimento do nosso modelo é a primeira frequência própria que corresponde ao movimento horizontal. Não obstante, para melhor compreensão, pretendemos calcular a quinta frequência própria mais baixa e os correspondentes valores próprios. Na caixa de diálogo *Configurações da análise*, na secção *Sismo*, vamos definir o número de valores próprios pretendidos como 5. Isto assegura que o algoritmo irá encontrar pelo menos os primeiros cinco valores próprios e frequências próprias. Também definimos os apoios de fronteira para a análise do valor próprio como *verticais*. Esta opção assegura que os deslocamentos verticais para os valores próprios são nulos. Isto é razoável dado que o acelerograma é apenas horizontal.

Fechamos a caixa de diálogo *Configurações da análise* e seleccionamos a opção *Parar cálculo após análise de valor próprio*, na janela *Análise*. Isto faz com que o programa execute as análises estática e de valores próprios. A análise é executada através do botão *Analisar*.



Resultados da análise modal

Os resultados da análise modal ficam disponíveis na parte inferior da janela *Análise*. O programa informa-nos que o algoritmo encontrou os cinco valores próprios pretendidos. As frequências próprias pretendidas estão listadas na tabela juntamente com os fatores de participação modal e massas modais efetivas. A massa modal efetiva diz-nos qual a contribuição do valor próprio respetivo para o movimento numa dada direção (horizontal ou vertical). No nosso modelo, a primeira massa modal efetiva na direção x é igual a 3657.92 ton métricas. A massa total do modelo é igual a 4649.88 ton métricas. Isto mostra que a frequência predominante do movimento horizontal é a primeira frequência própria $\omega_1 = 25.36$ rad/s e, assim, selecionamo-la como a frequência menos amortecida. Cada valor próprio pode ser visualizado selecionando *Valores: sismo: valor próprio*. Também é possível selecionar *Malha: deformações por valores* para mais detalhes.

Análise dinâmica

Os critérios do amortecimento estão definidos e podemos executar a análise dinâmica. Tiramos a seleção da opção *Parar cálculo após análise de valor próprio* e clicamos no botão *Analisar*. Tal como já descrito neste Manual, a análise dinâmica 2D é precedida pela análise de campo livre. Esta corresponde a uma análise dinâmica 1D da onda transversal e de pressão que se propagam através de um subsolo com várias camadas, que correspondem às camadas que existem à esquerda e à direita do modelo. Os resultados da análise de campo livre definem o tipo especial de condições de fronteira aplicadas juntamente com as fronteiras verticais na análise dinâmica 2D. Estas *condições de fronteira de campo livre* asseguram que as ondas mecânicas não são refletidas de volta para o modelo[†].

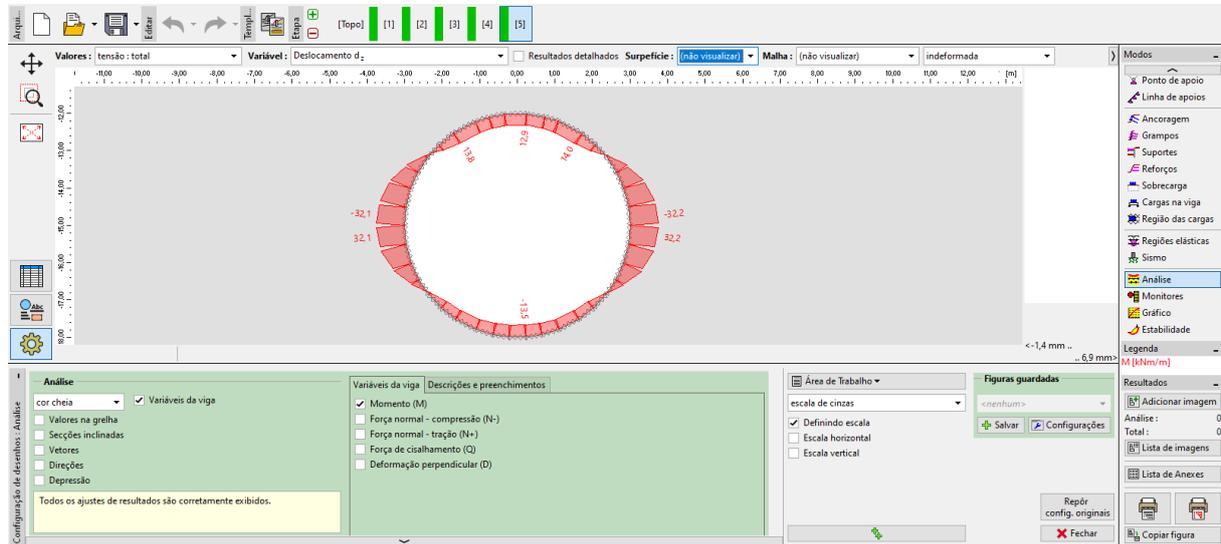
Os resultados finais do sismo são exibidos através de *Valores: sismo: total*.

Os resultados para cada intervalo no tempo são exibidos selecionando *Valores: sismo: no intervalo*. Se observarmos cada intervalo no tempo e quisermos exibir o modelo *deformado*, é conveniente unificar a escala da malha deformada, selecionando *Malha: deformada por valor*.

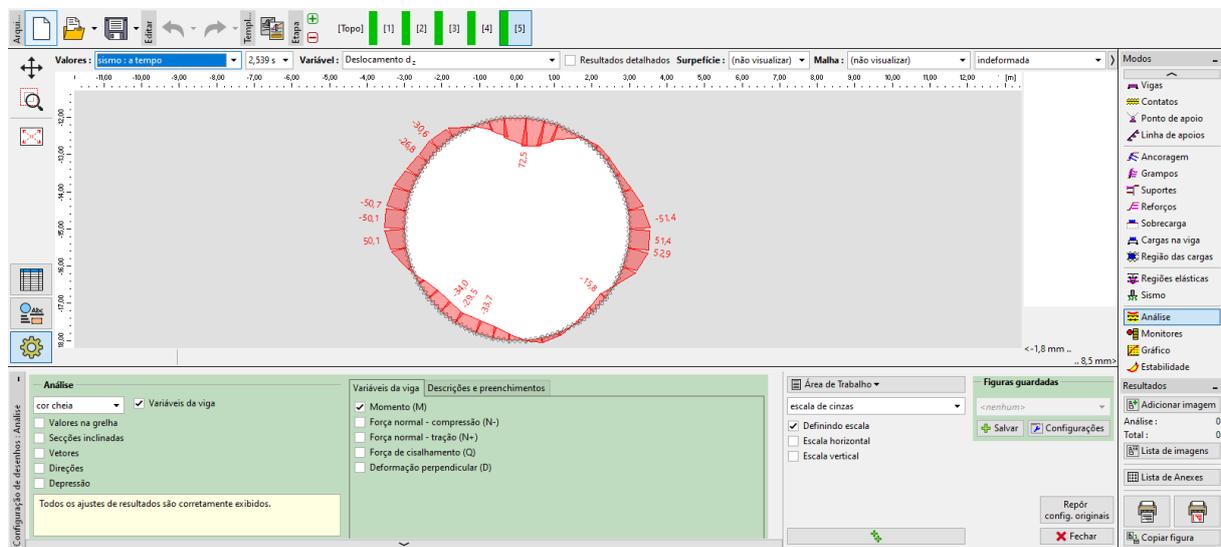
[†] As condições de fronteira fixas, bem como as livres, refletem os ondas mecânicas de volta para o modelo. Assim, nenhum destes dois tipos pode ser aplicado para fronteiras verticais e são implementadas as condições de fronteira de campo livre no GEO5 MEF – Análise Sísmica.

Para visualizar os momentos fletores, é necessário definir *Malha: indeformada* e seleccionar a opção *Variáveis da viga e Momento*, nas *Configurações de desenhos: Análise*.

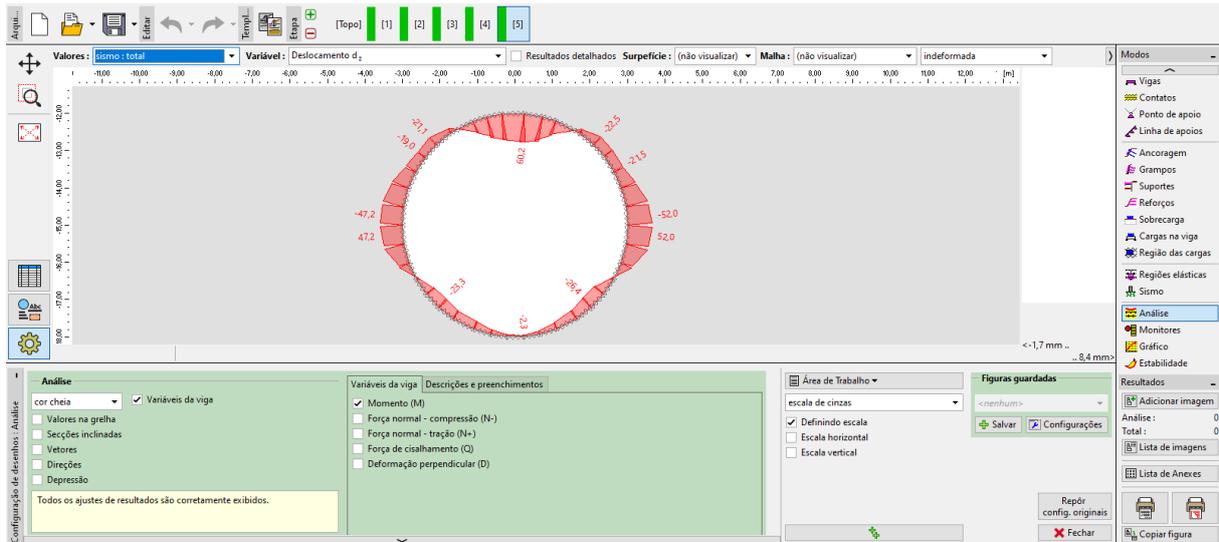
As imagens seguintes comparam os momentos fletores no revestimento, no final da análise estática (antes do sismo), para o instante $t = 2.539$ s, quando o momento fletor atinge o seu máximo, e no final da análise dinâmica.



Distribuição de momentos fletores antes do sismo

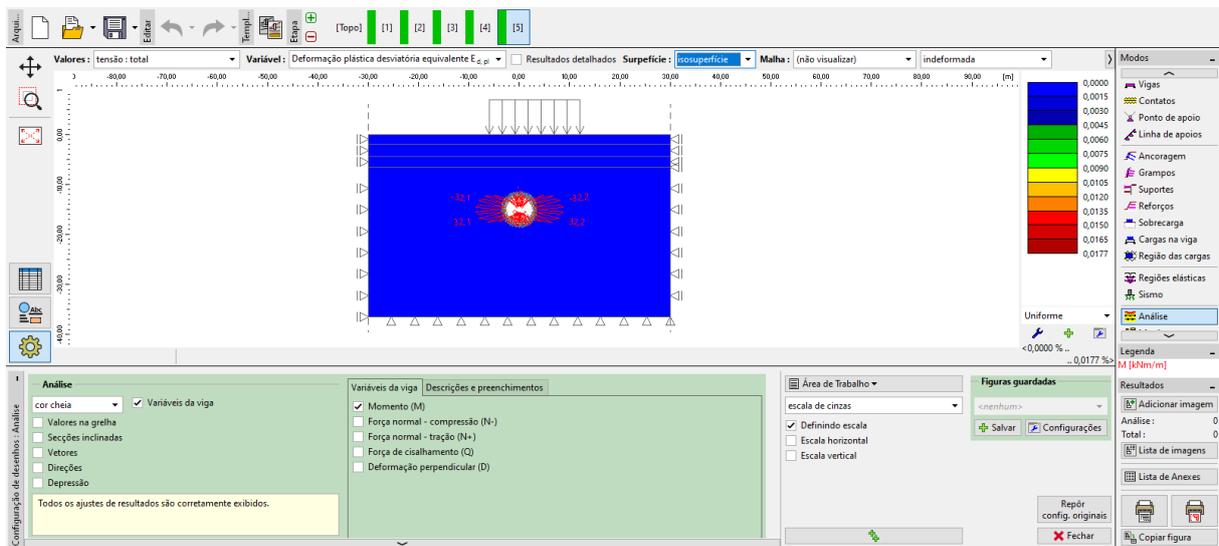


Distribuição de momentos fletores para o intervalo $t = 2.539$ s

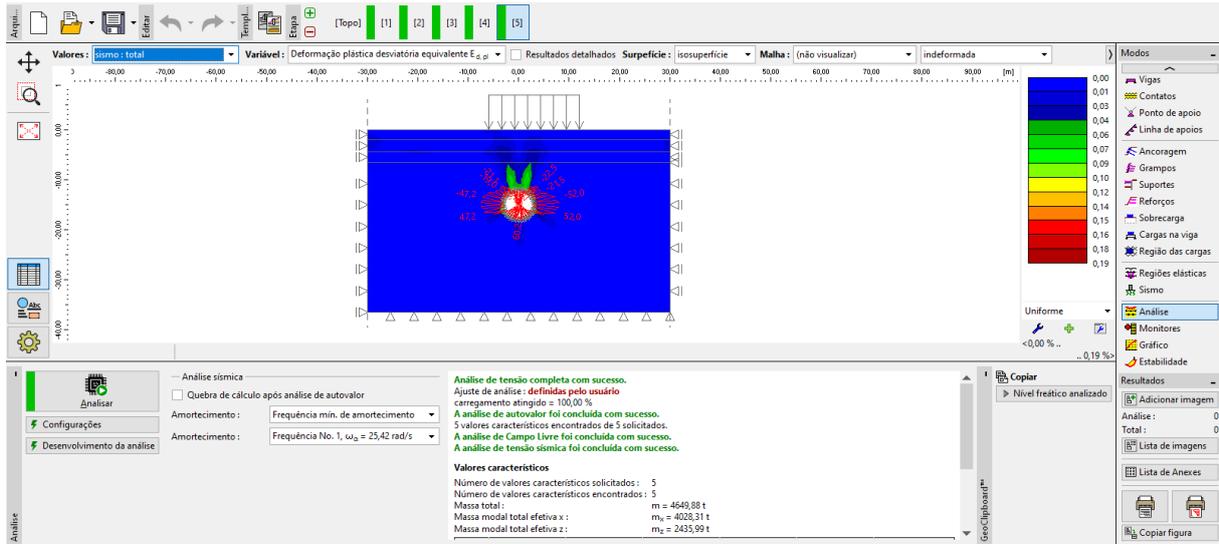


Distribuição de momentos fletores no final da análise dinâmica

A alteração permanente na distribuição do momento fletor está relacionada com a redistribuição da tensão devido ao desenvolvimento de zonas plásticas e associada a deformações permanentes do subsolo. As zonas plásticas no final da análise estática e análise dinâmica são exibidas nas imagens seguintes.



Áreas de deformação plástica equivalente antes do sismo



Áreas de deformação plástica equivalente no final da análise dinâmica

Conclusões

Neste Manual, alongámos o modelo existente no ficheiro “Demo_manual_48_init.gmk” com vários dados que são necessários para a análise dinâmica de um sismo. De acordo com o Eurocódigo 8, determinámos o tipo de solo e geramos um espectro de resposta e acelerograma compatíveis. Com base na análise de valores próprios e frequências próprias, seleccionámos a primeira frequência própria como a frequência de menor amortecimento.

Os resultados da análise dinâmica mostram o desenvolvimento significativo de regiões plásticas à volta do tunel e um aumento do momento fletor máximo de 32.1 kNm (momento máximo antes do sismo localizado nas laterais do tunel) para 60.2 kNm (momento máximo no final do sismo localizado no coroamento do tunel). O momento fletor máximo durante o sismo foi de 72.5 kNm.