

Análise do revestimento de um coletor

Programa:	MEF
-----------	-----

Arquivo: Demo_manual_23.gmk

O objetivo deste Manual de Engenharia é realizar a análise de um coletor, em especial da resposta do revestimento, utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Definição do problema

Determine a resposta do revestimento de um coletor; as suas dimensões são apresentadas abaixo. Determine as forças internas atuantes no revestimento do coletor. O revestimento do coletor (0.1 m de espessura) é realizado em concreto armado, classe C 20/25, com a base a uma profundidade de 12.0 m. O perfil geológico é homogéneo; os parâmetros do solo são os seguintes:

_	Peso volúmico do solo:	$\gamma = 20.0 kN/m^3$
_	Módulo de elasticidade:	E = 12.0 MPa
_	Coeficiente de Poisson:	v = 0.40
_	Coesão efetiva do solo:	$c_{ef} = 12.0 \ kPa$
_	Ângulo de atrito interno efetivo:	$\varphi_{e\!f}=21.0^{\circ}$
_	Peso volúmico saturado do solo:	$\gamma_{sat} = 22.0 kN/m^3$



Esboço do problema – coletor

Vamos determinar os valores dos deslocamentos e forças internas para o modelo elástico, uma vez que não é expectável o desenvolvimento de deformações plásticas. Vamos utilizar o modelo material de Mohr-Coulomb para a verificação da condição de cedência.



Resolução

Para analisar esta tarefa, vamos utilizar o programa GEO5 MEF. A resolução, passo-a-passo, do problema está dividida nos tópicos seguintes:

- Topologia: definição e modelação do problema (interface, pontos e linhas livres refinamento da densidade)
- Etapa de construção 1: tensão geostática primária
- Etapa de construção 2: modelação de elementos viga, análise de deslocamentos, forças internas
- Análise dos resultados: comparação, conclusão

Topologia: configurações do problema

Na janela "Configurações", vamos selecionar a opção "tensão geostática" para realizar a análise da etapa de construção 1. Vamos considerar o problema, ou o tipo de análise, como *plano de deformação*.

Т	- Parâmetros do projeto		- Normas de dimensionamente	0		— Opções avançadas do programa ————
	Tipo de projeto :	Plano de deformação	Estruturas de concreto :	EN 1992-1-1 (EC2)	•	Parâmetros avançados da geração de malhas
	Tipo de análise :	Tensão	- Cálculo de tensão geostática	(1° etapa)		Parâmetros avançados de solos
	Túneis		Método de análise :	Tensão geostática	-	Modelos de solos avançados
	Permitir a introdução de á	gua como resultado da análise de fluxo de água constante				Resultados detalhados
sções						
nfigura						
Ö						

Janela "Configurações"

De seguida, vamos definir as coordenadas globais e a interface do terreno. Vamos garantir que as dimensões globais são suficientes para garantir que os resultados da análise não são afetados pelas condições de fronteira. Neste caso, vamos definir as dimensões do modelo como $\langle -15 \ m; 15 \ m \rangle$; vamos definir a profundidade da camada em análise como 20.0 m.

Depois, vamos adicionar uma interface ao nível da superfície do terreno – coordenadas dos pontos (x, z): [-15, 0]; [15, 0] [m].



Janela "Interface" + Caixa de diálogo "Coordenadas globais"

Agora, vamos especificar os parâmetros do solo, incluindo o modelo material, e atribuir o solo à região criada (mais detalhes na Ajuda – F1).

Adicionar novos solos			×
— Identificação ————————		- Modelo elástico	— Desenhar ————
Nome : Solo No. 1			Categoria de padrão :
			GEO
— Modelo material —	? ·		Procurar :
Modelo material : elástico			Subcategoria :
— Dados base —	? ·		Solos (1 - 16)
Peso volúmico : γ =	20.00 [kN/m ³]		Padrão :
Módulo de Young : E = Rigidez de acordo com a prof. : Constante	12.00 [MPa]		3 Silte pedregulhoso
Coeficiente de Poisson : v =	0.40 [-]		Cor :
Computação de empuxos	(·		•
Cálculo da pressão hidrostática : padrao	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		Fundo :
Peso volúmico saturado : γ _{sat} =	22.00 [kN/m ³]		automático
			Saturação <10 - 90> : 50 [%]
Classificar Limpar			Adicionar Cancelar

Caixa de diálogo "Adicionar novos solos"



O passo seguinte é definir a geometria da estrutura. Primeiro, vamos definir as coordenadas dos pontos livres (botão "Adicionar"), de modo a formar as extremidades do coletor (mais detalhes na Ajuda – F1).

Acquirio	opo) [1]	
3.90 -3.60 -3.30 -3.00 -2.70 -2.40 -2.10 -1.80 -15	io -1.20 -0.90 -0.60 -0.30 0.00 0.30 0.60 0.90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00 3.30 3.60 3.90 4.20 4 [m]	Modos _
* °-		Projeto
		Seconfigurações
	1 5 2	interface
	S [-1 00* -10 50] [0 00* -10 50] [1 00* -10 50]	Solos
	["nao, "read] [ever, "read] [nao, "read]	Corpos rígidos
8 <u>9</u> -		dtribuir
8		🗯 Tipos de contatos
75		X Pontos livres
0P II.		🖍 Linhas livres
		Refinamento de pontos
		 Refinamento de linhas
8		C Refinamento livre
²⁴	[-1.00; -12.00] [1.00; -12.00]	🔛 Geração da malha
06 21		
I	Novos pontos livres X	
No Ioralização	- Localização de poptos livres	Resultados _
x [m] z [m]		Adicionar imagem
1 -1.00 -10.50		Pontos livres : 0
2 1.00 -10.50	z = [m]	Total: 0
4 -1.00 -12.00	A Addison M Country	E Lista de imagens
\$ > 5 0.00 -10.50	Adicionar 🗙 Cancelar	AA
os liv		
Pont		Copiar figura

Janela "Pontos livres" + Caixa de diálogo "Novos pontos livres"

Seguidamente, vamos ligar os pontos definidos, através de linhas, clicando no botão "Adicionar" da janela "Linhas livres" e utilizando o cursor para definir as linhas na Área de trabalho (mais detalhes na Ajuda – F1). Para definir um arco de raio R = 1.0 m, é necessário alterar o tipo de linha (botão "Editar").

Arquivo	💾 - 🕻	Editar			[1]							
0 ₩) 400 - 380 	-380 -340 -3	20 300 280 280 280 280 3	220 200 180 180 140 -	22 . 100 . 0.80 . 0.60 . 0.4	0 -0.20 0.00 0.20 0 1	49 0.650 0.050 1.000 1.20 1.40 1.5	0 180 200 220 2	40 260 280 300 320	340 350 360 440 420 4 64	Modos Projeto Configurai Configurai Interface Solos Corpos ríg Atribuir Tipos de c Pontos livi	- ções gidos contatos res
\$	00- 0010- 0010- 0010- 0012- 0				•	Editar propriedade — Tipo de linha — Tipo de linha : — Ponto inicial — Ponto de objeto Ponto livre : — Raio —	s da linha livre arco • : pontos livres • No. 2 (1.00; -10.50) •	 Modo de introdu Modo de introduç Ponto final Ponto de objeto : Ponto livre : Orientação 	raio pontos livres No. 1 (-1.00; -10.50)	× • •	Linhas livin Refinamer Refinamer Refinamer Refinamer Refinamer Refinamer Refinamer	es nto de pontos nto de linhas nto livre
* * * *	Adicionar graf D. Tipo de linha 1 arco 2 segmento	Modo de introduzir raio	Adicionar via texto	Editar No. 1 Elinhas c	X Remover No. 1 le topologia aio 1.00 [m] , orientaçã	Raio : ângulo incluído — Informação — Origem (1.00; -10.	R = 1.00 [m] obtuso	Orientação : raio 1.00 [m] , orient	positivo ação positivo , ângulo ot	• ituso	Resultados	- imagem 0 0
Linhas livres	3 segmento 4 segmento		Origem (1.00; -10.50) [m Origem (-1.00; -12.00) [m], final (1.00; -12.00) [m] n], final (1.00; -12.00) [m]		-		OK + 🔸	🗸 OK 🗙 Car	ncelar	E Lista de in	nagens

Caixa de diálogo "Editar propriedades da linha livre"

Vamos examinar os contornos da estrutura resultante. Após este passo, a configuração da geometria da estrutura ficará concluída e podemos passar à geração da malha de EF (mais detalhes na Ajuda – F1).

Quanto aos parâmetros de geração da malha, vamos definir o comprimento das extremidades dos elementos como 1.0 m e clicar no botão "Gerar". O programa irá gerar e suavizar a malha de EF automaticamente.



Janela "Geração da malha" – elementos com extremidade de 1.0 m (sem refinamento local)

É visível que a malha gerada é muito grosseira. Assim, vamos aumentar a sua densidade. É possível refinar a densidade da malha quer em torno de linhas, quer em torno de pontos. O refinamento da densidade da malha em torno do revestimento do coletor (escavação em geral) pode ser conseguido através do procedimento seguinte:

- especificar um ponto livre na vizinhança da escavação;
- refinar a densidade em torno do ponto especificado.

Nota: As forças internas em vigas são analisadas para cada ponto da malha, sendo necessário um refinamento suficiente das linhas e pontos livres da malha de EF (mais detalhes na Ajuda – F1).

GEO5

Para refinar a malha de elementos finitos, vamos especificar o raio respetivo como r = 12.0 m e a comprimento das extremidades dos elementos como l = 0.2 m. De seguida, voltamos à janela "Geração da malha" para gerar a malha de EF novamente.



Caixa de diálogo "Novos refinamentos de pontos"

Nota: A malha de elementos finitos deve ser suficientemente densa, especialmente nas regiões em que são expectáveis variações de tensões elevadas (apoios, extremidades, escavações subterrâneas, etc.). É necessário que este raio de refinamento da densidade seja, pelo menos, 3 a 5 vezes superior à densidade do centro de refinamento da densidade e que ambos os valores (densidade e raio) sejam razoavelmente proporcionais à densidade da malha definida para a região evolvente. Desta forma, assegura-se uma transição suave entre as diferentes densidades (mais detalhes na Ajuda – F1).

	Modos
Parametros de geração de malha Comp, do topo: 00 m m Maha de elementos fintos foi gerada com sucesso. Maha de elementos fintos foi gerada com sucesso. Maha de elementos sitas (região 2627, viga 132, vinteface 396) Me elementos 3135 (região 2627, viga 132, vinteface 396)	Resultados - Image: Adicionar imagem 0 Geração da malha: 0 Total: 6 Image: Adicionar imagems 0 Image: Adicionar imagems 1 Image: Adicionar imagems 1 Image: Adicionar imagems 1 Image: Adicionar imagems 1

Janela "Geração da malha" – elementos com extremidade de 1.0 m (com densidade da malha aumentada na região que envolve o coletor)

Etapa de construção 1: tensão geostática primária

Após voltar a gerar a malha, esta apresenta melhorias significantes. Agora, vamos passar à etapa de construção 1 e realizar a análise da tensão geostática primária. Vamos manter as configurações da análise "Padrão" (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela "Análise" – Etapa de construção 1

Etapa de construção 2: modelação de elementos viga

Na janela "Atividade", vamos começar por modelar a escavação do solo, relativa à área da secção transversal do coletor – vamos definir a região como inativa (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela "Atividade" – Etapa de construção 2

De seguida, passamos à janela "Vigas" para modelar o revestimento do coletor. Vamos definir os seguintes parâmetros: localização da viga (considerando todas as linhas livres), material e classe do concreto, altura da secção transversal (0.1 m) e apoios nas extremidades da viga (mais detalhes na Ajuda – F1).

	[2]	
	270 380 320 380 320 420 430 510 540 570 650 650 650 720 750 780 780 780 930 <th>Modos _ Atividade Atribuir Nivel freático Vigas Contatos Secon te conclo</th>	Modos _ Atividade Atribuir Nivel freático Vigas Contatos Secon te conclo
	Linha livre : Linha livre No. 3	▲ ronto de apoio ▲ funha de apoios ▲ Ancoragem ■ Suportes ■ Sobrecarga ■ Cargas na viga ₩ Regiões elásticas ₩ Anónitores ₩ Gráfico
	ly = 8.33E-05 m ⁴ /m; A = 1.00E-01 m ² /m; E = 30000.00 MPa; G = 12500.00 MPa	🤙 Estabilidade
You Adjiconar grantamente Paggi Addichar via teto Viga Viga Posição Adjiconar No. Viga Posição Ponto inicial Ponto	□ Introduzir contato esquerdo □ introduzir contato direito □ Introduzir contato esquerdo ■ introduzir contato direito Tipo de contato : ▼ ○ Introduzir contato (k+) ○ OK +) ○ OK +) ○ OK +)	Resultados _ Malcionar imagem Vigas : 0 Total : 0 ∭ Lista de imagens
Viga	v	Copiar figura

Caixa de diálogo "Novas vigas" – Etapa de construção 2

Agora, vamos executar a análise e visualizar os resultados para a tensão geostática $\sigma_{z,ef} [kPa]$, deslocamentos laterais $d_x [mm]$ e forças internas no revestimento do coletor.



Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (tensão geostática vertical $\sigma_{z,el}$)

A partir da imagem é possível verificar que o deslocamento horizontal é de 2.2 mm (o coletor comporta-se como um corpo rígido). Para uma melhor compreensão do comportamento da estrutura, vamos visualizar a malha deformada (botão na parte superior do ecrã).



Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (deslocamento horizontal d_x após a escavação do solo)

Nota: Cada visualização apresentada no ecrã pode ser baixada como um objeto independente. Estas também podem ser editadas posteriormente. Desta forma, o processo de visualização de resultados é significativamente mais rápido (mais detalhes na Ajuda – F1).

Acquires	[Topo] [1] [2]				
Valences: total Vanised: Assentamento d. 00 3600 3000 3000 2700 2400 2100 100 100 00 00 3000 3000 2700 2400 2100 100 100 00 00 00 00 2000 100 100 100 00 00 00 00 100 100 100 100 00 00 00 00 100 100 100 100	z Surpetice isosuperice 500 -200 400 400 -300	Matha: (não visualizar) indeformada n00 300 600 900 1200 500 1200 2 100 300 600 900 1200 500 1200 2 100 100 100 100 100 100 1 101 11 11 11 1 1 101 11 11 1 1 101 11 1 1 1	2200, 3000, 3300, 1	500 PT 60 45 64 65 65 65 65 65 65 65 65 65 65	Modos ▲ Atividade ▲ Atirbuir ➡ Nivel freático ➡ Vigas ➡ Contatos ▲ Contatos ▲ Contatos ▲ Contatos ▲ Cargas na viga ➡ Regiões elásticas
		Nova figura X	Area de Trabalho ▼	 + + Figuras guardadas 	Monitores Gráfico Stabilidade
corcheia Variáveis da viga Valores na grelha Secções inclinadas Vectores Vectores Vectores Direções Todos os ajustes de resultados são corretamente exibidos.	Simbolos dos pontos Coordenadas dos pontos Valores	Propriedades Nome: Assentamento dz e Depressão	escala de cinzas Definindo escala Escala horizontal Escala vertical	<nenhum> Salvar Padrão configurações Radrão configurações X fechar</nenhum>	Resultados

Caixa de diálogo "Nova figura"

Agora, vamos examinar os diagramas dos momentos fletores M[kNm/m], forças de cisalhamento Q[kN/m] e forças normais compressivas $N^{-}[kN/m]$ para a etapa de construção 2 (através do botão "Configurações" da secção "Variáveis da viga").

Nota: Para manter uma clareza na compreensão dos resultados suficiente, existem valores que não podem ser visualizados em simultâneo. Por exemplo, não é possível visualizar a estrutura deformada e os diagramas das forças internas ao longo das vigas em simultâneo; apenas é possível visualizar estas opções separadamente. O programa emite um aviso na parte inferior da caixa de diálogo se forem selecionadas duas opções que não podem ser visualizadas em simultâneo (mais detalhes na Ajuda – F1).



A armadura do revestimento do coletor pode ser dimensionada e avaliada em qualquer programa de análise estática (ex.: FINE EC – CONCRETE 2D). Vamos sumariar os resultados obtidos numa tabela.



Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (variações no momento fletor M)



Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (variações na força de cisalhamento Q)

↑ Valores: total v Variável: Assentamento d z v Surpeficie: (não visualizar) v Matha: (não visualizar) v indeformada v Modos	-
510 -480 -450 -420 -380 -380 -380 -320 -200 -200 -180 -150 -120 -180 -060 -130 0.00 0.30 0.00 120 120 120 120 240 270 3.00 3.30 3.00 3.30 4.20 4.50 4.80 510 [m]	e
	ático
8	anoio
309.1	apoios
-209.1 -209.1 FArcong	em
207620752075	
E Fretoror	
≝ Sobreca	ga
	a viga
	elécticas
-2147	
	2
s	-
I _ Análise Variáveic da vina Depressão Descrições e preenchimentos III Área de Trabalho ▼ Figuras guardadas N-18//m)	
cor cheia V Variaveis da viga Momento (M)	
Valores na grelha / Force normal - compressão (N-)	r imagem
₹ Secções inclinadas Força normal - tração (N+) Força hormal - tração (N+)	ninogeni
2 Vetores Força de cisalhamento (Q) Escala vertical Analos :	0
E Direções Deformação perpendicular (D)	0
© ✓ Depressão	magens
🔮 Todos os ajustes de resultados são corretamente exibidos. Padrão	
configurações 📲	1
🛐 🔧 🗡 Fechar	gura

Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (variações na força normal de compressão $\,N^-$)

Verificação da condição de cedência: modelo material de Mohr-Coulomb

Agora, vamos verificar o desenvolvimento de deformações lineares ao utilizar modelos não lineares. Vamos voltar ao modo "Topologia" e alterar o modelo material para "Mohr-Coulomb", na janela "Solos".

Editar parâmetros do solo				×
— Identificação ———		- Modelo Mohr - Coulomb	?	- Desenhar
Nome :	Solo No. 1	Modulo descarga/recarga :	E _{ur} = 12.00 [MPa]	Categoria de padrão :
		Ângulo de atrito interno :	φ _{ef} = 21.00 [°]	GEO
— Modelo material ———	?	Coesão do solo :	c _{ef} = 12.00 [kPa]	Procurar :
Modelo material :	Mohr - Coulomb	Ângulo de dilatação :	ψ = 0.00 [°]	Subcategoria :
— Dados base ———	?			Solos (1 - 16)
Peso volúmico :	γ = 20.00 [kN/m ³]			Padrão :
Módulo de Young :	E = 12.00 [MPa]			
Rigidez de acordo com a prof. :	constante 💌			77777777777777777777777777777777777777
				3 Silte pedregulhoso
Coeficiente de Poisson :	v = 0.40 [-]			Cor:
— Computação de empuxo	>> ?			•
Cálculo da pressão hidrostática :	padrão			Eundo :
Peso volúmico saturado :	$\gamma_{sat} = 22.00 [kN/m^3]$			automático
				Saturação <10 - 90> ; 50 [%]
Classificar Limpar				VOK X Cancelar

Caixa de diálogo "Editar parâmetros do solo"

Arquiri... [Topo] [1] [2] nte E_{d. ol} 🔻 📃 Resul > ↔ os Surpefície : isosuperfície Mal ha: (não v Atividade Q 8 2 💻 Vigas 800 Y Ponto de aj 8 🖍 Linha de ap 8 🗲 Ancorage 🗲 Gram Suportes
 Reforços
 Sobrecarga 100 8 📇 Cargas na vio 🐺 Regiões elá **بر** 0,00 ؟ Moni Gráfico I B Copiar
Nível free 啷 Análise de tensão completa com sucess Ajuste de análise : definidas pelo usuário carregamento atingido = 100.00 % B* Adicionar Configurações otal : 🗲 Dese ento da análise E^H Lista de imagen 7

Após executar a análise, vamos visualizar as deformações plásticas equivalentes.

Janela "Análise" – Etapa de construção 2 (deformações plásticas equivalentes $\mathcal{E}_{eq.,pl.}$ de acordo com o modelo de MC)

A partir do diagrama obtido é possível visualizar que a condição de cedência para o modelo de Mohr-Coulomb não é excedida – as deformações plásticas equivalentes $\mathcal{E}_{eq.,pl.}$ são nulas, o que corresponde a um comportamento da estrutura determinado de acordo com o modelo material elástico. Os valores resultantes para os deslocamentos, tensões geostáticas e forças internas são idênticos.

Análise dos resultados

A tabela seguinte apresenta os resultados para os valores máximos, e mínimos, das forças internas ao longo das vigas (revestimento do coletor), para a etapa de construção 2 (valores dos momentos fletores, forças de cisalhamento e forças normais). A análise foi realizada segundo um modelo material elástico, com aumento da densidade da malha de elementos triangulares.

Modelo material	Etapa de construção 2				
	$N^{-}[kN/m]$	$M\left[kNm/m ight]$	$Q\left[kN/m ight]$		
Elástico	- 160.2	+ 61.8	+ 202.5		
	- 214.7	- 61.8	- 201.3		

Diagramas das forças internas ao longo de vigas (extremos) – Etapa de construção 2



Conclusão

A partir dos resultados da análise numérica, podem ser definidas as seguintes conclusões:

- O refinamento local da densidade da malha de elementos finitos permite resultados com maior precisão.
- Se os modelos materiais não lineares (ex.: Mohr-Coulomb) conduzirem a valores nulos para as deformações plásticas equivalentes *E*_{eq.,pl.}, o comportamento da estrutura é elástico e os resultados das forças internas, deslocamentos e tensões são idênticos para ambos os tipos de modelo.

Nota: A análise realizada baseia-se numa hipótese irrealista em que o revestimento é executado ao mesmo tempo que a escavação do solo é realizada. Este procedimento seria adequado em estruturas realizadas em solos moles (estruturas introduzidas completamente no solo). Na realidade, a massa do solo é descarregada e deformada na direção da área escavada, durante a escavação do solo. Um exemplo real da modelação de um túnel é apresentado no capítulo 26. Modelação numérica da escavação de um túnel através do método NATM.

Se, neste caso em particular, o revestimento não fosse ativado imediatamente (pode ser modelado em outra etapa sem especificar os elementos viga), a escavação teria colapsado; para um modelo elástica, isto seria representado através de grandes deformações, enquanto que para um modelo não linear o programa não seria capaz de obter uma solução.



Análise sem elementos viga (assentamento d_z de acordo com um modelo linear)

Arquivo		
		Atividade
	▷ ▷ ▷ ▷ ▷	Vigas Contatos Ponto de apoio
	ID Erro de análise. 4 ID (1) [W071] falha ao convergir análise. Número máximo de flexibilidade do cálculo executido. 4 ID (0) carregamento atingido = 75.00 % 4	 C Linha de apoios Ancoragem Suportes ⊂ Reforços Sobrecarga
		Regiões elásticas Análise Monitores Gráfico Stabilidade
Terminar Escrevendo resultados Análise		sultados _
Etapa : 2 Etapa de cálculo : 4 Tamanho da etapa de cálculo : 0.06250 [-] Número de iterações : 3 Percentagem de carga atingida : 812 [%] Número de relaxamentos da eta 2	3 0.3414 0.14611 5.43181 0.73855 An Analises divergentes. Calculo 4 To To	vàlise : 4 stal : 6 ∰ Lista de imagens
Analise	Analises divergentes.	Copiar figura

Caixa de diálogo "Erro" – análise sem elementos viga (segundo o modelo de MC)