

### Análisis de revestimiento del colector

Programa: MEF

Archivo: Demo\_manual\_23.gmk

El objetivo de este capítulo es analizar de un colector minado con énfasis en la respuesta del revestimiento utilizando el Método de Elementos Finitos.

#### Especificación del problema:

Determine la respuesta al revestimiento de un colector minado; sus dimensiones se pueden ver en el siguiente cuadro. Determinar las fuerzas internas que actúan sobre el colector revestido. El revestimiento del colector (0,1 m de espesor) está hecho de hormigón armado, clase C 20/25, la parte inferior está a una profundidad de 12,0 m. El perfil geológico es homogéneo; los parámetros del suelo son los siguientes:

- Peso unitario del suelo:  $\gamma = 20.0 kN/m^3$
- Módulo de elasticidad: E = 12.0 MPa
- Coeficiente de Poisson: v = 0.40
- Cohesión del suelo:  $c_{ef} = 12.0 kPa$
- Ángulo de fricción interna:  $\phi_{\scriptscriptstyle e\!f}=21.0~^\circ$
- Peso unitario del suelo saturado:  $\gamma_{sat} = 22.0 \, kN/m^3$



Características de especificaciones del problema – colector minado

Vamos a determinar los valores de desplazamientos y las fuerzas internas sólo para el modelo elástico porque no esperamos el desarrollo de deformaciones plásticas. Posteriormente vamos a utilizar el modelo de material de Mohr-Coulomb para la verificación de condiciones de rendimiento.

#### Solución:

El análisis se realizó con el Programa de MEF de GEO5. El siguiente párrafo proporciona la descripción paso a paso del procedimiento:

- Topología: configuración para el modelado del problema, (interfaz, puntos y líneas libres, refinamiento de densidad)
- Etapa de construcción 1: tensión geostática primaria
- Etapa de construcción 2: Modelado de elementos viga, análisis de desplazamiento fuerzas internas.
- Evaluación de los resultados: comparación, conclusión.

### Topología: configuración del problema

En al cuadro "Configuración" seleccionamos la opción tensión geoestática para realizar el análisis de la etapa de construcción 1. Consideramos el problema o el tipo de análisis como "Deformación plana"

	Datos del proyecto		Cálculo de la tensión geoestática (fase 1)			
	Proyecto tipo :	Deformación plana	▣	Método de análisis :	Tensión geoestático	
	Tipos de análisis :	Tensión	▣	Estándares de diseño		
	🔲 Túnel		_	Estructuras de hormigón :	EN 1992-1-1 (EC2)	•
	🔲 Permite la entrada de agua	a como resultado del análisis de flujo de agua inestable				
ción	🔲 Entrada avanzada					
igura	🔲 Resultados detallados					
je j						

### Cuadro "Configuración"

Además vamos a establecer las coordenadas globales y la interfaz del terreno. Elegiremos dimensiones globales lo suficientemente grandes para que los resultados no se ven afectados por las condiciones en el límite. Para nuestro problema particular vamos a elegir las dimensiones de modelo  $\langle -15 \ m; 15 \ m \rangle$ , y ajustamos la profundidad de la capa a examinar a 20,0 m

1		onfiguración de rangos	🕂 Añadir interfaz	Coordenadas globales	
	Número	Interfaz interfaz 1		— Dimensiones Rango mínimo de X : Rango máximo de X : Profundidad de modelo por debajo del punto más profundo de interfaz :	<b>-15,00</b> [m] 15,00 [m] 20,00 [m]
Interfaz			V		OK 🛛 🔀 Cancelar

Cuadro "Interfaz" + Cuadro de diálogo "Coordenadas globales"

Ahora vamos a especificar los parámetros del suelo, incluyendo el modelo de material y posteriormente asignamos el suelo a la región creada (para más información, visita la Ayuda - F1).

Añadir suelos						
— Identificación ——						Dibujar
Nombre :	Suelo Nº1					Color
— Modelo de materia	əl ————				?	
Modelo de material	:	Elástico				Trama
— Datos Básicos —					?	
Peso unitario :		γ =	20,00	[kN/m <sup>3</sup> ]		
Módulo de elasticid	ad :	E =	12,00	[MPa]		
Rigidez según la pr	ofundidad :	constante	9			
Coeficiente de Pois	son :	v =	0.40	[-]		
– Subpresión –		· [	0,10		[9]	l -
Modo de cálculo de	subpresión :	Estándar		•		, ,
Peso unitario de su	elo saturado	$\gamma_{rat} =$	22,00	[kN/m <sup>3</sup> ]		
		radi [	,	1		
— Modelo Elástico —					0	۱-
1 Iodolo Elabolo					0	, Clasificación
						Clasificar
						Claro
						🕒 <u>A</u> ñadir
						Cancelar

Cuadro "Añadir suelos"

El paso siguiente es establecer la geometría de la estructura. En primer lugar se definen las coordenadas de los puntos libres (botón "Añadir"), formando las esquinas del colector (para más información, visite la Ayuda - F1).

Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	<ul> <li>Cuadros</li> <li>Proyecto</li> <li>Proyecto</li> <li>Configuración</li> <li>Interfaz</li> <li>Suelos</li> <li>Cuerpos rígidos</li> <li>Asignar</li> <li>Metinado de contacto</li> <li>Puntos libres</li> <li>A finado de puntos</li> <li>Refinado de lineas</li> <li>Generar malia</li> </ul>
	_
Image: Section of the section of t	Salidas – E <sup>A</sup> Añadir gráfico Puntos libres : 0 Total : 6 E <sup>A</sup> Lista de gráficos E <sup>A</sup> Lista de gráficos

Cuadro "Puntos libres" + "Nuevos puntos libres"

Luego, seleccionamos el botón "Añadir" en el cuadro "líneas libres" y conectaremos los puntos con líneas, con la ayuda del mouse (para más información, visite la Ayuda - F1). Para configurar el arco con el radio R = 1.0 m, tenemos que cambiar el tipo de línea (mediante el botón "Editar").



Cuadro "Modificar propiedades de línea libre"

Vamos a examinar la estructura resultante del contorno. A través de este paso, la configuración de la geometría del colector finalizará y vamos a ir a la generación de malla de EF (para más información, visite la Ayuda - F1).

Para los parámetros de generación de malla vamos a elegir como longitud de borde:1,0m y presionamos el botón "**Generar**". El programa generará de forma automática y sin problemas la malla de EF.



*Cuadro "generación de malla longitud del borde 1.0 m (sin refinamiento local)"* 

Es evidente a primera vista que la malla que se genera alrededor del colector es muy gruesa. Por lo tanto, vamos a aumentar la densidad. Podemos refinar la densidad de la malla, ya sea alrededor de las líneas o alrededor de puntos libres. El siguiente procedimiento es adecuado para el refinamiento de la densidad de alrededor del revestimiento del colector (la excavación en general):

- Vamos a especificar un punto en las proximidades del centro de excavación
- Vamos a refinar la densidad en torno a este punto.

Nota: Las fuerzas internas en las vigas se analizan en los puntos individuales de la malla y por lo tanto es necesario refinar lo suficiente las líneas y puntos libres de la malla de EF (para más información, visita Ayuda - F1).

## **GEO5**

Para refinar la densidad de la malla de elementos finitos, vamos a especificar el radio respectivo r = 12.0 m y el elemento de borde de longitud l = 0.2 m. Luego regresaremos al cuadro "Generar malla" y generamos la nueva malla de EF.

Archiv	vo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda	
Archivo		
.†	-4,00 -3,00 -2,00 -1,00 0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 [m]	Cuadros _
<b>₩</b>		Proyecto
C		🔅 Configuración
		☐ Interfaz
1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1		💹 Suelos
<u>e</u>		📕 Cuerpos rígidos
		🧮 Asignar
		🗯 Tipos de contacto
		X Puntos libres
		🖉 Líneas libres
		Refinado de puntos
	8	😑 Refinado de líneas
		Generar malla
	Nuevos refinados de puntos	
50	ß - Punto	
~~	Punto objeto : Puntos libres V	
• 6	de 🕐 Añade reférences a de 🖾 Añade textualmente Punto libre : N° 5 (0,00:-10,50)	Salidas 🗕
L L	- Refinado	B <sup>+</sup> Añadir gráfico
	Numero         Ubicación         Radio         r =         12,00         [m]	Refinado de puntos : 0
	▶ 1 Punko libre № 5 12,00 0,20 A	Total: 6
ntos		E Lista de gráficos
e pu	et al and a second seco	AA
ado o		
Refin		Ba Copiar vista

#### Cuadro "Nuevos refinados de puntos"

Nota: Los elementos de malla debe ser lo suficientemente densos, especialmente en la región donde se pueden esperar grandes gradientes de tensión (Punto de Apoyo, esquinas afiladas, excavaciones subterráneas, etc.) Es necesario que este radio de densidad-refinado sea al menos de 3 a 5 veces más grande que la densidad en el centro de refinado densidad y ambos valores (densidad y radio) en los puntos deben estar a una proporción razonable de la densidad de la malla prescrita para la región circundante. De esta forma la transición entre las regiones con diferentes densidades estará asegurada (para más información, visite la Ayuda - F1).

Archivo Eukar Entratia Salitas Colingurationes Ayuta	
1 200 -3000 -2700 -2400 -2100 -1800 -1800 -1200 -3000 -42,00 -300 0,00 -200 8,00 -200 1800 -2100 2400 2700 3000 [m]	Cuadros _
	Proyecto
	🔅 Configuración
	☐ Interfaz
	Suelos
	Cuerpos rígidos
Escalar la vata para que rootos los objetos sean visibiles	🗮 Asignar
	🗯 Tipos de contacto
	X Puntos libres
	🖌 Líneas libres
	📀 Refinado de puntos
	😑 Refinado de líneas
	🛱 Generar malla
8	
Denerar     O Análisis de errores	Salidas _
Datos de generación de la malla Resultado de la generación de malla	ET Añadir gráfico
Longitud del borde 1,00 [m] La malla de elementos finitos fue creada satisfactoriamente.	Generarmaila: 0
✓         Suavizado de mala         Nimero de nodos 5998           Nimero de elementos 3155 (cona 2627, vina 132, interfaz 396)         Nimero de elementos 3155	R <sup>III</sup> Lista de gráficos
📲 F Generar elementos multi nodo	
§	Copiar vista

Cuadro "Generar Malla"– longitud de borde de EF 1.0m (con una densidad de malla mayor al colector que rodea)

#### Etapa de construcción 1: Tensión geoestática primaria

Después de la generación, la malla en las proximidades del colector se ve significativamente mejor. Ahora vamos a pasar a la etapa de construcción 1 y llevaremos a cabo el análisis de la tensión geostática primaria. Vamos a mantener el entorno de análisis "Estándar" (para más información, visite Ayuda - F1).

Archive	Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda												
Archivo		· 🖫 · 📲 🌖	• Plantilla	Etapa	[Торо] [1]	[2]							
<u>ب</u> ل	Valores : C	Completo 👻 Variable :	Sigma <sub>Z, eff</sub> ,	Superficie	: isosuperficie	• Malla :	(no visualizar)	▼ sin deforma	ir 🗸				Cuadros
·†,	,00 1 - 1 - 1	-27,00 -24,00 -21,00	-18,00 -15,0	0 -12,00 -9,0	0 -6,00 -3,	00 0,00	3,00 6,00	9,00 12,00	15,00 18,00	0 21,00 24,00 27,00	[m]	0,00	Activ
Q	<u></u>								ы			35,00	Asigr
	- 81											105,00	Agua
25	8		ID									140,00	Jan Vigas
	~ -		ID									175,00	Punto
	8-		IÞ									210,00	Línea
	12		IÞ						$\triangleleft$			280,00	- Ancla
	900										- 1	315,00	Ц Ароу
	3											385,00	Refu
	1,00										12	394,49	📥 Sobre
													🐺 Regic
	-15,0												🗮 Análi:
	8-											_	Monit
	# -										Ur	niforme 🔻	Grafi
5	8				$\Delta  \Delta  \Delta$	ΔΔ	$\Delta  \Delta  \Delta$		2		<0	- 💌 🌛	
2005	~ -										~~	394,49 kPa>	
1	🕨 Analizar	Configuraciones								🖲 Curso del análisis	• 6	🖹 Copiar	Salidas
	El análisis de l	tensión fue completad	o satisfactoriar	nente.							1	NF analizado	B* Añad
	Configuración d Análisis elástico	e análisis : <b>estándar</b>											Análisis : Total :
	Carga alcanzad	a = 100,00 %											B <sup>III</sup> Lista
											ž		
											board		
nálisis											eoClip		B3. Copia
₹											Ű		- B cobie

Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 1

### Etapa de construcción 2: Modelado de elementos viga

En el cuadro "Actividad", primero modelamos la excavación del suelo desde la sección transversal del colector - fijaremos la zona afectada como inactiva (para más información, visite la Ayuda - F1).



Cuadro "Actividad" – Etapa de construcción 2

# GEO5

Luego nos dirigiremos al cuado "Viga" y vamos a modelar el revestimiento del colector minado. Vamos a definir los siguientes parámetros - localización de viga (tomamos todas las líneas libres en consideración), material y clase de hormigón, altura de sección (0,1 m) y los soportes de extremos de la viga (para más información, visite la Ayuda - F1).

Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda							
13,00 -30,00 -27,00 -24,00 -21,00 -18,00 -15,00 -12,00	0 -9,00 -6,00 -3,00 0,00 3,00 6,00 9,00 12,00 15,00 18,00 21,00 24,00 27,00 30,00 [m]	tros 🗕					
· ↓	Vigas nuevas 🛛 🕹 📲	Actividad					
	- Topología	Asignar					
	Ubicación : Línea libre 🔽 Nombre : Nosnik čis. 3	Aqua					
	Línea libre : Línea libre Nº 3 💌 - Soporte						
	Parámetros Punto de inicio	Vigas					
	🔽 Incluir el peso propio 🛛 Punto de fin : 📔 🔽	Contactos					
	– Sección transversal y material	Punto de apoyos					
P	Tipo de secc. trans. : muro rectangular 💌 Tipo de material : hormigón 💌	unea de apoyos					
	Altura de la serción transversal : h = 0.10 [m] Nombre : C 20/25	Anclajes					
		Apoyos					
81	Ancho de la sección transversal : $D = 1,00$ [m] Cacalogo Personalizar $F_{\mu\nu}$	Refuerzos					
1		Sobrecarga					
	A	Cargas sobre viga					
	I <sub>V</sub> = 8,33E-05 m <sup>4</sup> /m; A = 1,00E-01 m <sup>2</sup> /m; E = 30000,00 MPa; G = 12500,00 MPa	Regiones elásticas					
8	- Contactos	Análisis					
¥-	🗖 Introducir contacto a la izquierda 🦷 Introducir contacto a la derecha 🖷	Monitores					
	🛆 🖌 Tipo de contacto : 🛛 🔍 🗐	Gráficos					
κ <sup>δ</sup> -	<i>)</i>	Estabilidad					
	💽 Añadir 🛛 🖾 Cancelar						
1 🕂 🖉 dőadir gráficamente 📑 🖓 🖾 dőadir textualmente 👘 🖉 Editar Mro	Salid	las 🗕					
		Añadir gráfico					
Número Viga Ubicación S Dunte de inicia	Soporte [m] Incluir Sección transversal Material Cont Viga	s: 0					
1 Si Línea libre Nº 4	Tota	l: 6					
2 Si Línea libre Nº 1	→ 1,00 (b) × 0,10 (h) m C 20/25 (no ingresado)	Lista de gráficos					
⇒ 3 Si Línea libre № 3	→ 1,00 (b) × 0,10 (h) m C 20/25 (no ingresado)						
4 Si Línea libre Nº 2		<b>r</b> (7)					
8		Copiar vista					
\$		Copial Visca					

Cuadro "Nueva viga" – Etapa de construcción 2

Ahora vamos a llevar a cabo el análisis y vamos a visualizar los resultados de la Tensión geostática vertical  $\sigma_{z,ef}$  [kPa] el desplazamiento lateral  $d_x$  [mm] y las fuerzas internas en el revestimiento del colector.



### Cuadro "Análisis" - Etapa de construcción 2 (Tensión geoestática vertical $\sigma_{z,ef}$ )

Se desprende de la imagen que el desplazamiento horizontal máximo es de 2,2 mm (el colector se comporta como un cuerpo rígido). Para entender mejor el comportamiento de la estructura, vamos a visualizar la malla deformada (botón en la parte superior de la pantalla)



Cuadro "Análisis" - Etapa de construcción 2 (desplazamiento horizontal d<sub>x</sub> después de la excavación del suelo)

Nota: Las vistas actuales presentadas en pantalla también se pueden descargar como objetos independientes (utilizando el botón rojo en la parte superior izquierda del escritorio, en la barra de herramientas horizontal). Desde allí también se pueden administrar después. De este modo la visualización de los resultados se acelera de forma significativa (para más información, visite la Ayuda -F1).

Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda						
Archive Archive Blandle C Effer C E	[Topo] [1] [2]					
Valores: Completo Variable: Asiento d <sub>Z</sub>	Superficie: isosuperficie      Malla: (no visualizar)	deformado por magnitud 🔻 1,00 🗘 😳 [m]	Cuadros _			
-6,00 -5,00 -4,00 -3,00	-2,00 -1,00 0,00 1,00 2,00	3,00 4,00 5,00 [m]	Actividad			
			6,0 Asignar			
			5,4 🚾 Agua			
			4,8 📕 Vigas			
			9,2 Contactos			
8÷			3,0 X Punto de apoyos			
	-3,1		2,4 🖌 Línea de apoyos			
	2,6		1,8 Anclaies			
	2,4		1,2 ADOVOS			
	2,3		0,0 JE Refuerzos			
	2,3		0,3 📇 Sobrecarga			
2 2- 1	22,4		📇 Cargas sobre viga			
	2		🐺 Regiones elásticas			
			Análisis			
		Uniforme	▼ Monitores			
			🔽 Gráficos			
8 B B B B B B B B B B B B B B B B B B B		<-6.5 mm	🖉 Estabilidad			
		0,3	mm>			
1		Escritorio - Vistas guardadas	Salidas _			
Analisis	Valores en la matriz		E* Añadir gráfico			
Color completo	Valores en la matriz : nodos en la malla 💌	escala de grises	Análisis : 4			
Sectiones indinadas	, F	Definiendo rango     Guardar     Zonfiguraci	n Total: 6			
Vectores	/	Escala Vertical	Lista de gráficos			
Direcciones		Configura				
y Depresion		por defec				
Todas las configuraciones de resultados se muestran correctamente.		🖲 🛛 🔀 Cerr	r 📑 Copiar vista			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						

Barra de herramientas horizontal + cuadro "Nuevo dibujo"

Ahora vamos a examinar los diagramas para momentos de flexión M [kNm/m] fuerzas de corte Q [kN/m] y fuerzas normales de compresión  $N^- [kN/m]$  para la etapa de construcción 2 (con el botón "Muestra" en la solapa "Distribuciones").

Nota: Para mantener la claridad y comprensión, algunos resultados no se pueden mostrar simultáneamente. Por ejemplo, es imposible trazar una estructura deformada simultáneamente con diagramas de fuerzas internas a lo largo de la viga, sino que siempre es necesario elegir sólo una variante. El programa da aviso en la parte inferior de la ventana de diálogo en el caso de combinaciones de valores inadmisibles de salidas (para más información, visite la Ayuda - F1).

El revestimiento de colector puede ser diseñado y evaluado para estos valores en cualquier programa estático arbitrario (por ejemplo FIN EC - 2D CONCRETO). Vamos a registrar los resultados en una tabla resumen.



Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda							
Yalores:         Completo         ▼         Yariable:         Asiento d <sub>Z</sub> ▼	Superficie: (no visualizable)  Malla: (no visualizar)	▼ sin deformar ▼	Cuadros _				
-4,20 -3,90 -3,60 -3,30 -3,00 -2,70 -2,40 -2,10 -1,80 -1,50 -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 [m]	Actividad				
0_:			Asignar				
			Agua				
<b>N 8</b>	Y.		🚌 Vigas				
	1.5 A.5		### Contactos				
82			¥ Punto de apoyos				
			Línea de apoyos				
8	8.8 5.8 36 -68		Anclajes				
	18,3 -13,3		Apoyos				
<u><u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u></u></u>			Reruerzos				
- 8			Cargas sobre viga				
# <u></u>			T Regiones elásticas				
82			an áiric				
	2 Second Se		Monitores				
			" ~				
	6 61		<-6,5 mm M [kNm/m]				
			0,3 mm>				
- Análisis	Variables de vinas Desvesión Desseinsiones y vallance	Escritorio - Vistas guard	ladas				
color completo 💌 🗹 Variables de vigas	E Harracta (III)	escala de grises	Añadir gráfico				
8 Valores en la matriz	Fuerza normal - compresión (N-)	✓ Definiendo rango	Anàlisis : 4				
Secciones inclinadas	Fuerza normal - tensión (N+)	Escala horizontal	E" Lista de gráficos				
e Direcciones	Fuerza cortante (Q)     Deformación perpendicular (D)	I Escala Vertical	Configuración				
Depresión			por defecto				
Todas las configuraciones de resultados se muestran correctamente.		۲	Cerrar B1 Copiar vista				
° ~							

Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 2 (variación del momento de flexión M)



Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 2 (variación de la fuerza de corte Q)

Archive	Archivo Editar Entrada Salidas Configuraciones Ayuda							
Archivo								
٦Ť.	Valores:         Completo         Variable:         Asiento d <sub>Z</sub>	Superficie: (no visualizable)      Malla: (no visualizar)	▼ sin deformar ▼		Cuadros _			
Ŧ	-4,20 -3,90 -3,60 -3,30 -3,00 -2,70 -2,40 -2,10 -1,80 -1,50	-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 [r	n]	Actividad			
D	2				🗮 Asignar			
	2	183,9			Agua			
$\geq$	8	a Via			🚌 Vigas			
	*	A June 7			🗯 Contactos			
	82	A share the second s			A Punto de apoyos			
	<sup>7</sup> -				Línea de apoyos			
	2 2	124			🔊 Anclajes			
	-20	9.1			≒ Apoyos			
	8 20	9,1 209,1			_ F Refuerzos			
	20	7,5 -207,5			Sobrecarga			
	<del>2</del>				Cargas sobre viga			
					🐞 Regiones elásticas			
	83				Análisis			
	8-				Monitores			
~	-214	4,7 -214,7			Leyenda _			
रु	9			<-6,5 mm	N- [kN/m]			
					- Salidas _			
1	Análisis	Variables de vigas Depresión Descripciones y rellenos	Escritorio -	ardadas	B* Añadir gráfico			
: Ané	olor completo 💽 🗹 Variables de vigas	Momento (M)	escala de grises	~	Análisis : 4			
ficos	Valores en la matriz Secciones inclinadas	✓ Fuerza normal - compresión (N-)	🔽 Definiendo rango 🔳 Guarda	r 🗾 Configuración	Total : 6			
e grál	Vectores	Euerza normal - tension (N+)     Euerza cortante (O)	I Escala horizontal     Escala Vertical		E <sup>III</sup> Lista de gráficos			
ión de	Direcciones	Deformación perpendicular (D)	- County for them	Configuración				
gurac	Depresion			por defecto				
Config	Todas las configuraciones de resultados se muestran correctamente.		•	🔀 Cerrar	■ Copiar vista			
~	*							

Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 2 (variación de la fuerza de compresión normal  $\Box \Box N$ )

### Verificación de la condición de rendimiento: modelo de material Mohr-Coulomb

Ahora vamos a verificar si las deformaciones plásticas se desarrollan al adoptar modelos no lineales. Volveremos al modo "Topología" y cambiamos el modelo de material a "Mohr-Coulomb" en "Suelos". Después de completar el análisis, vamos a examinar las deformaciones plásticas equivalentes.





Cuadro "Verificación" – Etapa de construcción 2 (deformación plástica equivalente  $\varepsilon_{eq.,pl.}$   $\Box$ según el modelo MC) $\Box$ 

Se desprende del diagrama anterior que la condición de rendimiento para el modelo Mohr-Coulomb no se excede – las deformaciones plásticas equivalentes  $\mathcal{E}_{eq,pl.}$   $\Box$  son cero, correspondiente a la estructura de comportamiento determinada según el modelo de material elástico. Los valores resultantes de los desplazamientos, la tensión geostática y fuerzas internas son idénticos.

#### Resultados de la evaluación:

La siguiente tabla muestra los valores de fuerzas internas extremas a lo largo de las vigas (el revestimiento del colector) para la etapa de construcción 2 (los valores de los momentos, las fuerzas de corte y las fuerzas normales de flexión). Hemos llevado a cabo este análisis de un modelo de material elástico con un aumento de densidad local de elementos triangulares.

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

Curvas para fuerzas internas a lo largo de las vigas (extremos) – Etapa de construcción 2

#### **Conclusión:**

Las siguientes conclusiones se pueden extraer de los resultados del análisis numérico

- El refinamiento de densidad local de la malla de elementos finitos conduce a resultados más precisos.
- Si los modelos de materiales no lineales (por ejemplo, Mohr-Coulomb) conducen a valores cero de deformaciones plásticas equivalentes \varepsilon\_{eq.,pl.}, la estructura se comporta elásticamente y los resultados de las fuerzas internas, desplazamientos y tensiones son idénticos para ambos tipos de modelo.

Nota: El análisis que hemos llevado a cabo está basado en una suposición poco realista de que el revestimiento actúa simultáneamente con la excavación del suelo. Este procedimiento sería adecuado para estructuras llevadas a cabo por elevación a través de suelos blandos (elevación de estructuras completas en el suelo). En realidad se descarga la masa de tierra y deforma en la dirección del espacio excavado cuando se está excavando el suelo. Un verdadero ejemplo de modelado de túnel se describe en el Capítulo 26. Modelado numérico de la excavación del túnel según el método NATM.



Si, en nuestro caso particular, el revestimiento no se había activado de inmediato (puede ser modelado como otra etapa sin especificar los elementos de viga), la excavación se habría derrumbado, por el modelo elástico esto se presenta por grandes deformaciones, mientras que el programa no encontrará la solución en el caso de modelo no lineal.



Análisis sin elementos de viga (Asiento  $d_z$  según el modelo elástico)



Cuadro "Error" – análisis sin necesidad de utilizar elementos de viga (según el modelo MC)