

2^{da} Convención Científica Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad. Perspectivas y Retos

Validación de procedimientos constructivos para túneles mediante métodos numéricos

Dr. Alejo O. Sfriso

Vicepresidente por Sudamérica y el Caribe de ISSMGE (2017-2021)

Universidad de Buenos Aires
SRK Consulting (Argentina)
AOSA

materias.fi.uba.ar/6408
latam.srk.com
www.aosa.com.ar

asfriso@fi.uba.ar
asfriso@srk.com.ar
asfriso@aosa.com.ar

Contenido

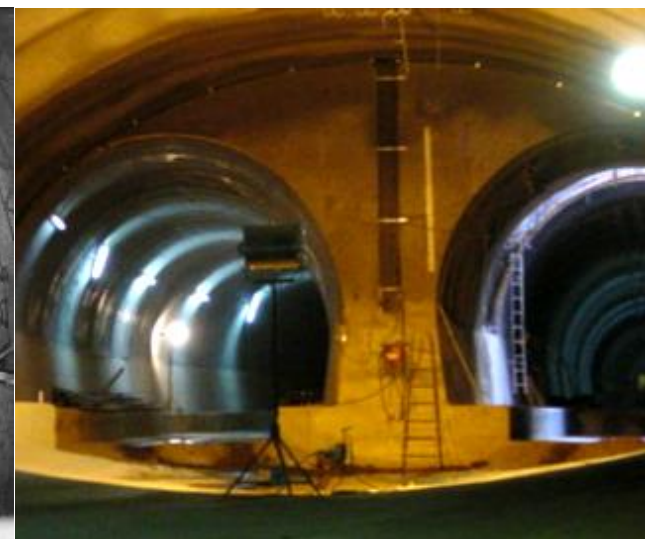
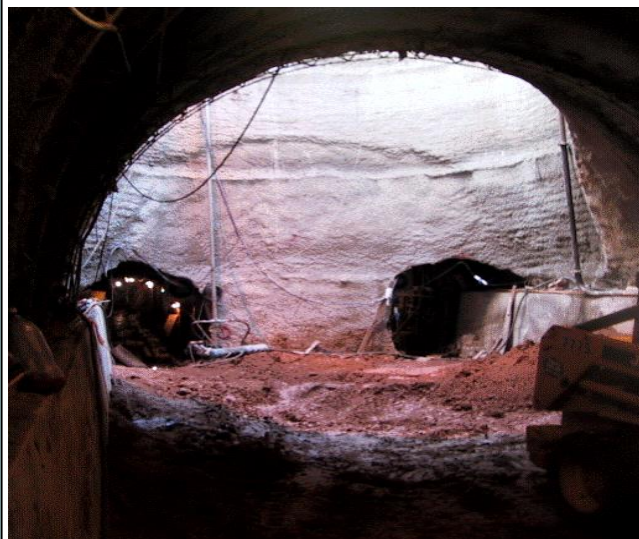
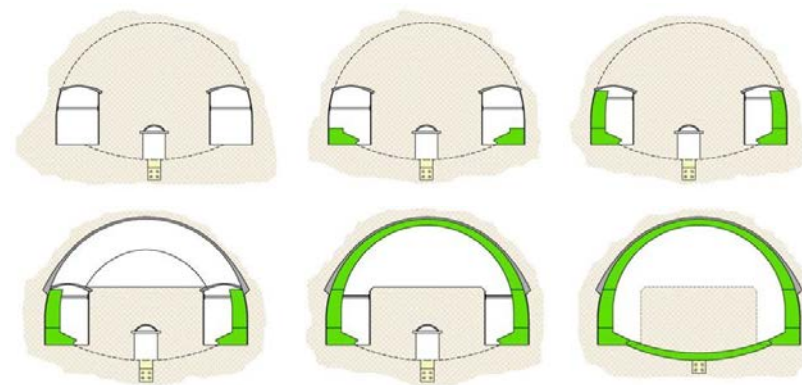
- Procedimientos constructivos para túneles de frente abierto
- Simulación de procedimientos constructivos
- Diseño del revestimiento definitivo
- Ejemplo: El túnel Mujer Urbana
- Resumen



Método alemán

srk

1. Hastiales de hormigón armado
2. Bóveda primaria de H^o proyectado
3. Bóveda secundaria de H armado
4. Solera de hormigón armado



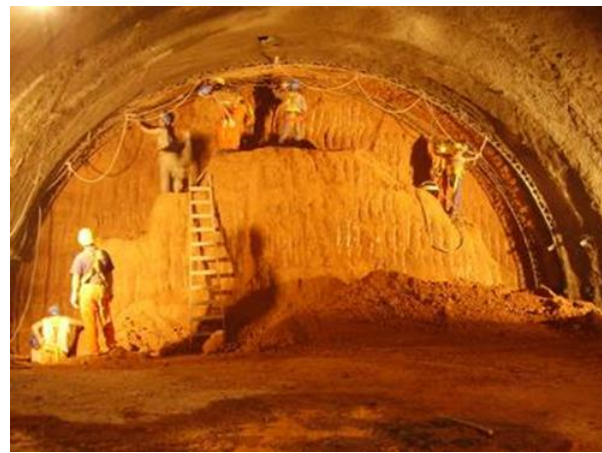
Método belga

1. Bóveda primaria de H° proyectado
2. Bóveda secundaria de H° simple
3. Banco
4. Hastiales por troneras de H° A°
5. Solera de H° A°



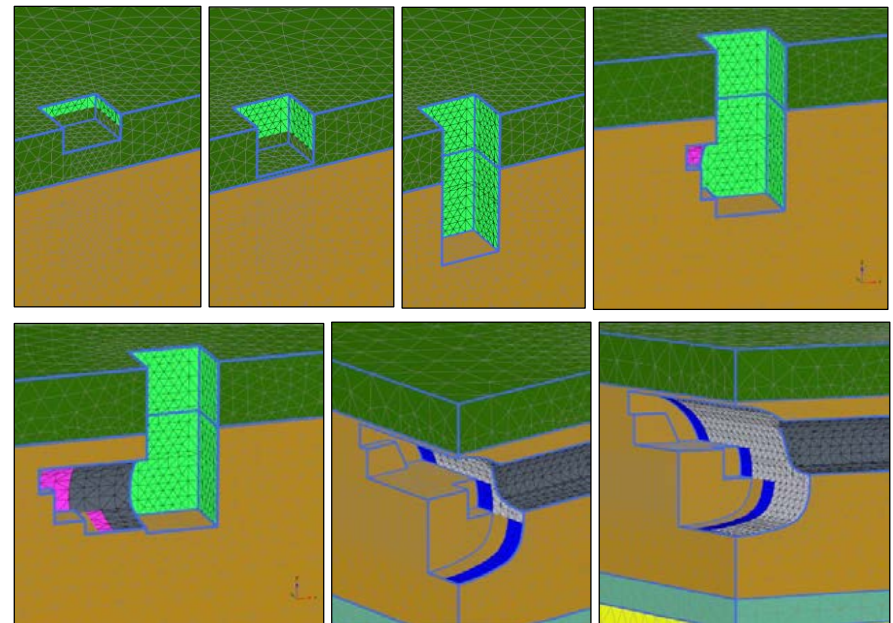
Método de frente completo

1. Bóveda primaria y hastiales de H° proyectado
2. Excavación de solera en paños limitados
3. Solera de H° A $^{\circ}$
4. Bóveda secundaria y hastiales de H° simple



Contenido

- Procedimientos constructivos para túneles de frente abierto
- Simulación de procedimientos constructivos
- Diseño del revestimiento definitivo
- Ejemplo: El túnel Mujer Urbana
- Resumen



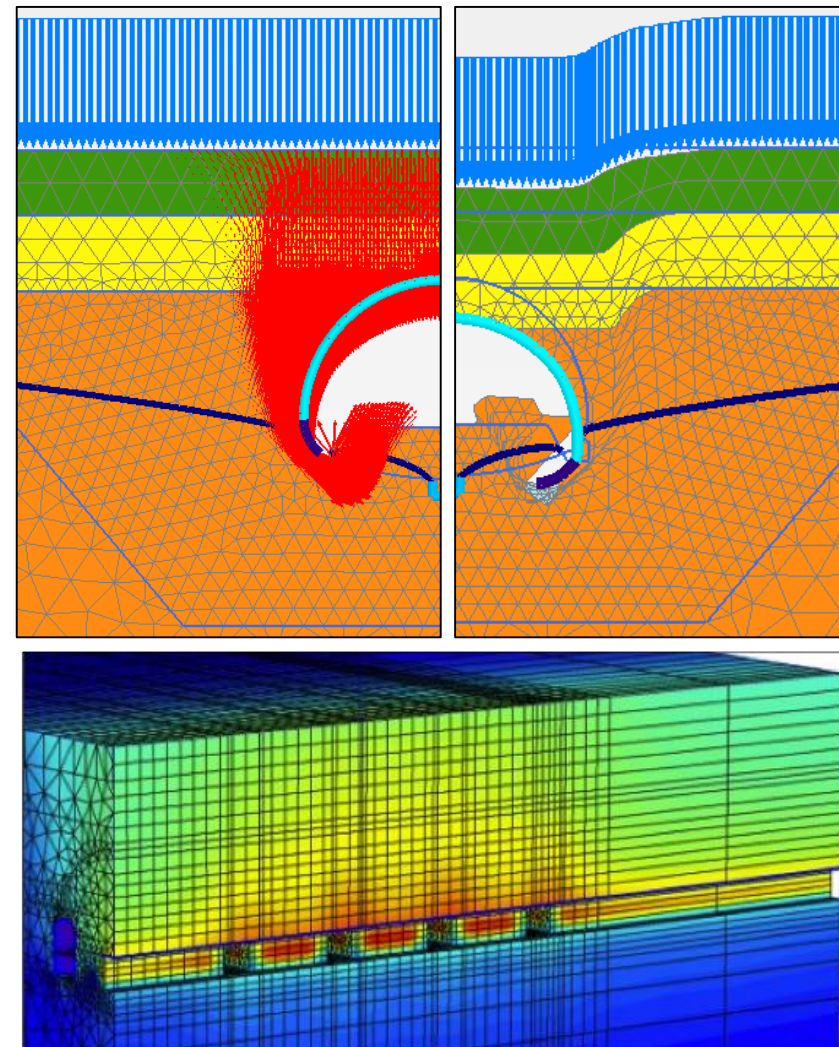
Modelos numéricos para túneles de frente abierto

Modelos 2D

- Simulación (simplificada) de procedimiento constructivo
- Asentamientos superficiales
- Solicitaciones estructurales

Modelos 3D

- Simulación (realista) de procedimiento constructivo
- Estabilidad del frente
- Secciones no cilíndricas

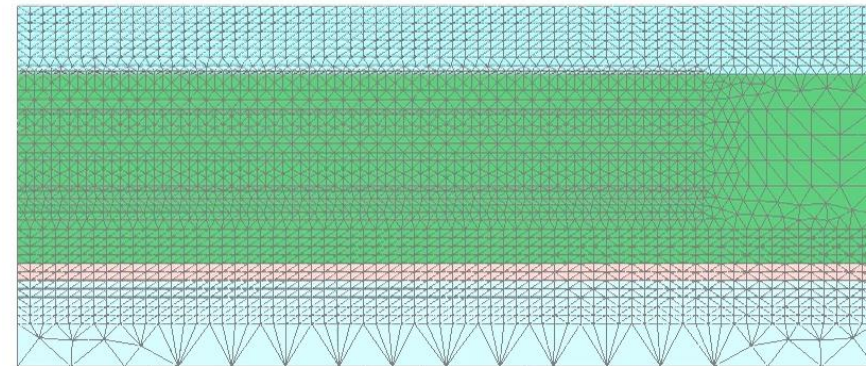
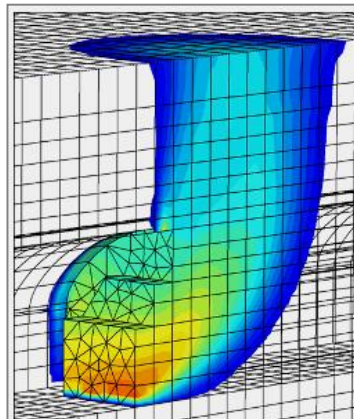
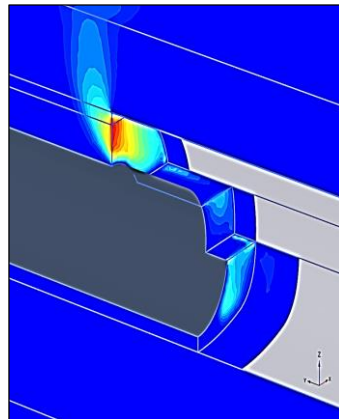
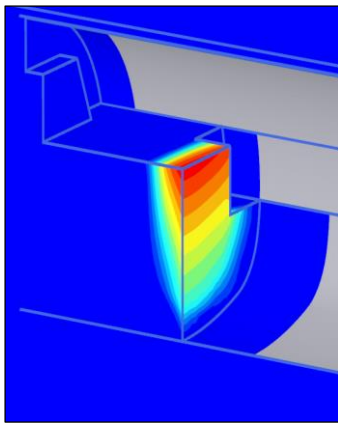
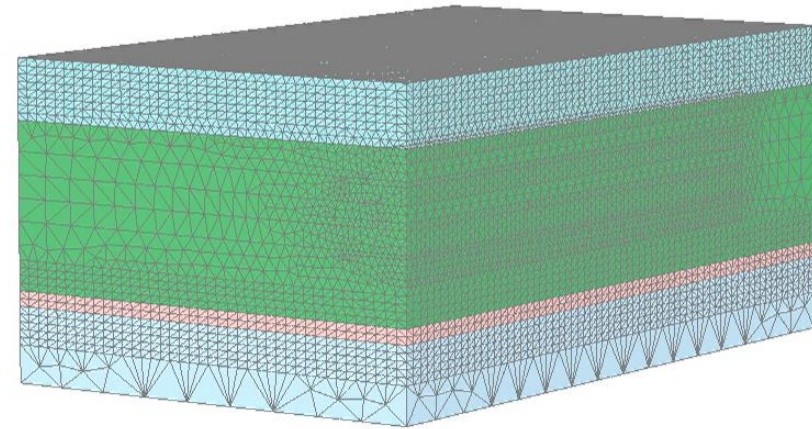
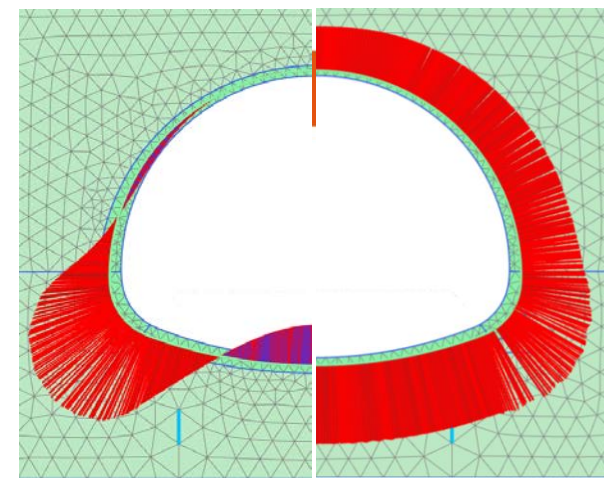


Modelos 2D para procedimientos constructivos de túneles

Los modelos 2D permiten determinar

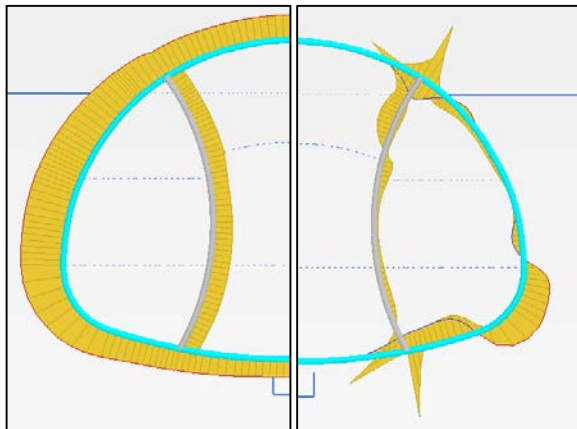
- **Solicitaciones estabilizadas** en sostenimiento primario y definitivo
- **Deformaciones** en el terreno
- Impacto sobre estructuras vecinas

No son útiles para evaluar estabilidad del frente

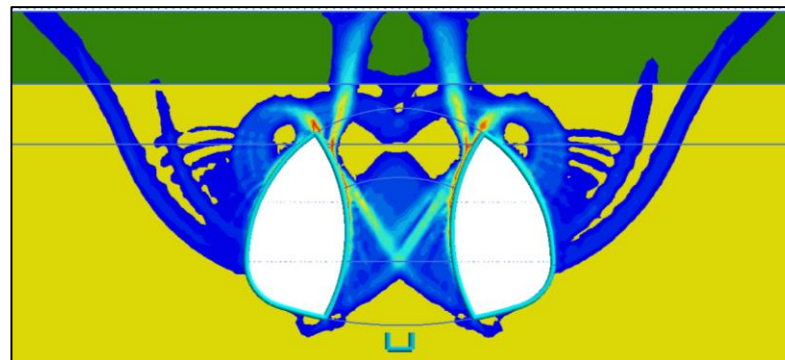
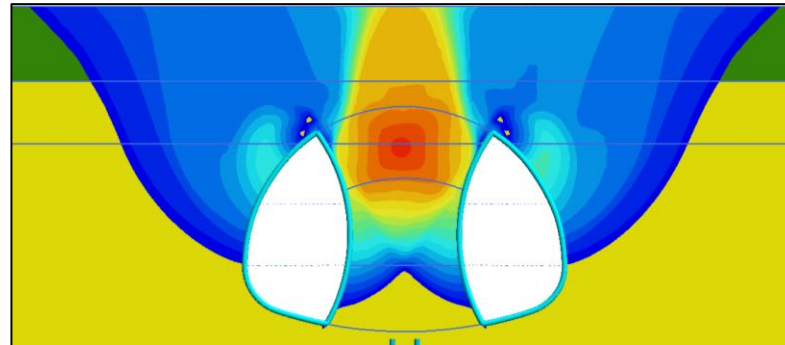
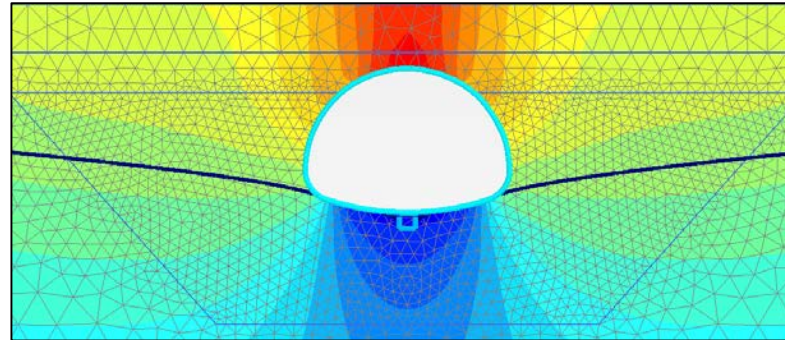


Modelos 2D para túneles de ojivas

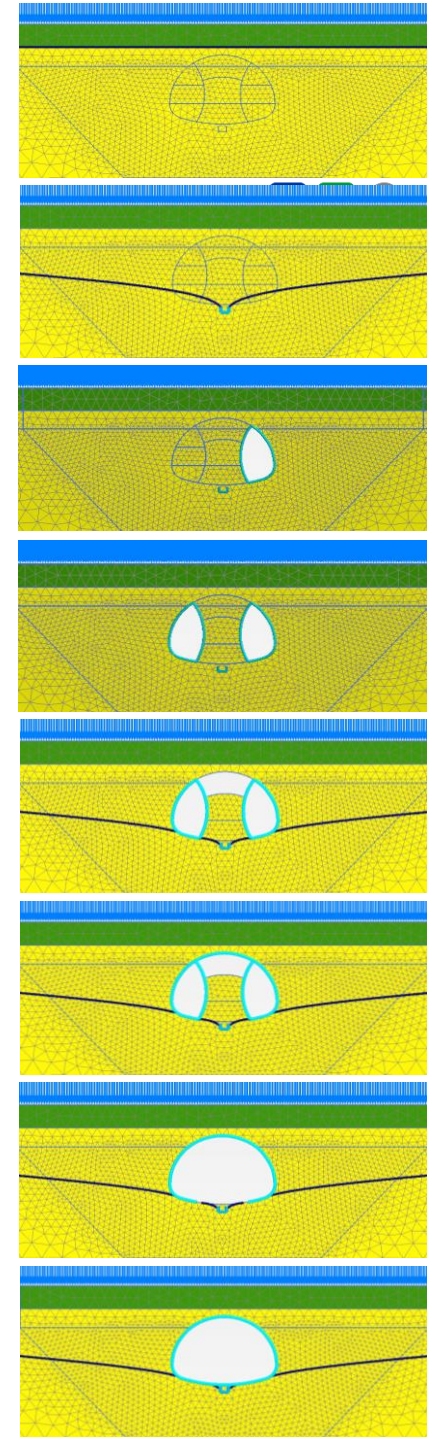
- Desplazamientos
- Solicitaciones estructurales
- Modos de falla (2D)
- ~~Seguridad frente~~



Estructura

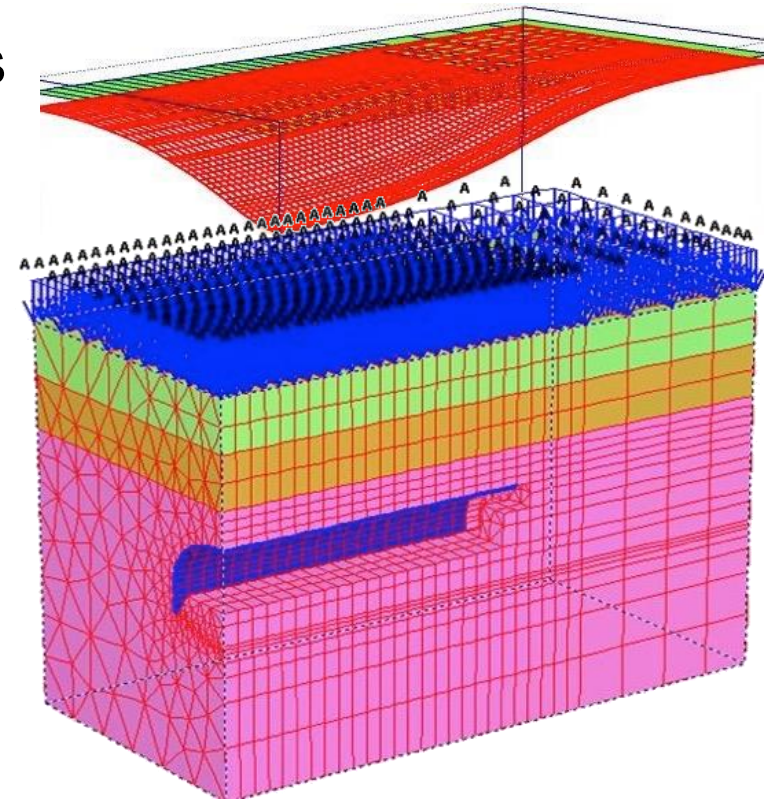
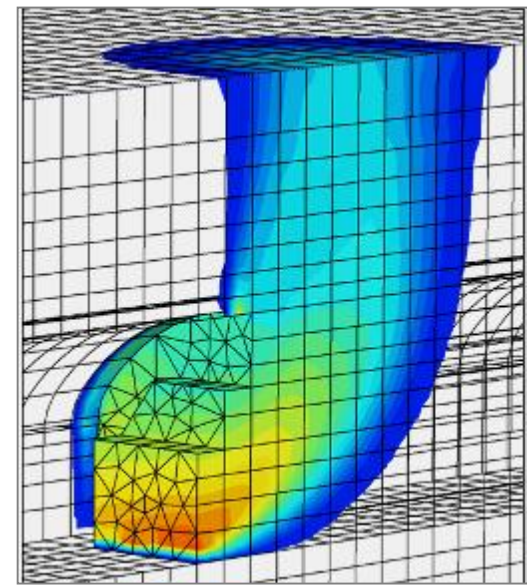
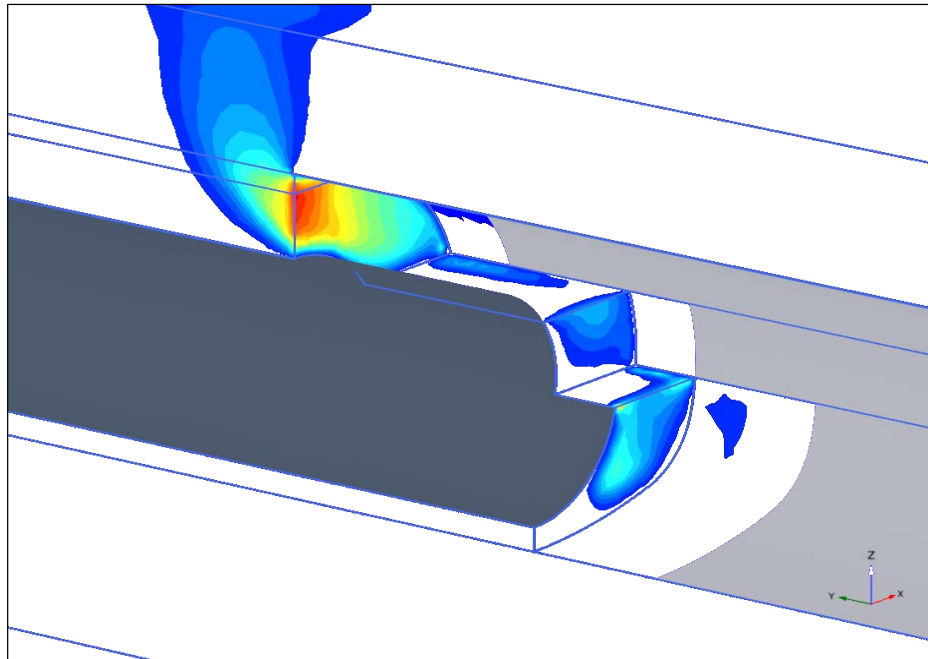


Terreno



Objeto de la modelización 3D

- **Validar procedimientos constructivos**
- Calcular factores de seguridad y modos de falla del frente
- Determinar el mapa de asentamientos



Diseño de un modelo 3D

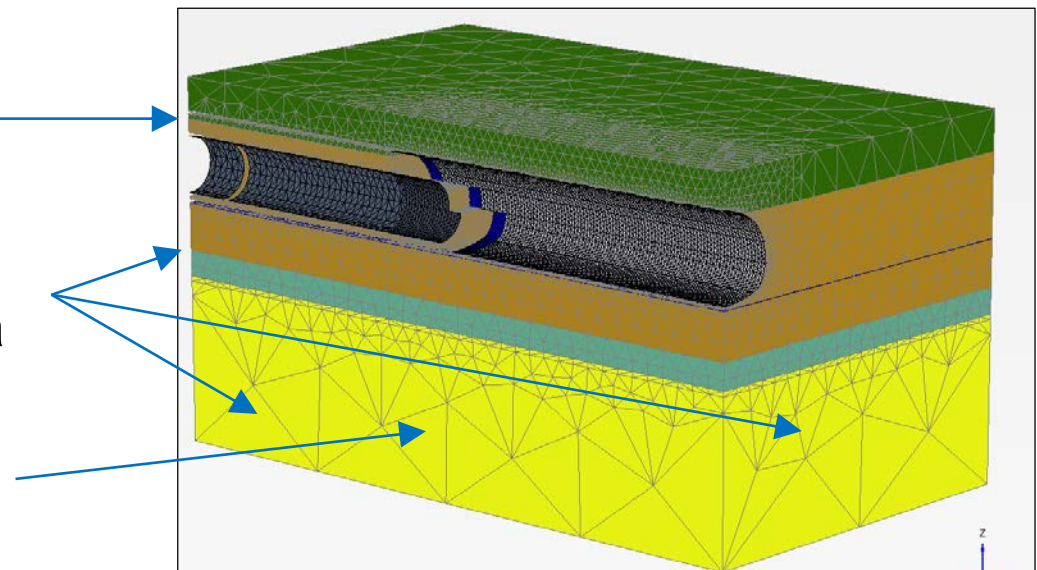
Objeto: no intente responder todas las preguntas a la vez

- Seguridad en el frente: varias mallas cortas, determine el avance óptimo
- Asentamiento en superficie: malla larga, muchas etapas, refinamiento moderado en bóveda

Refinamiento en función
del objeto del modelo

Los bordes verticales
son planos de simetría

Elementos muy grandes
lejos del problema, donde
esperamos respuesta elástica

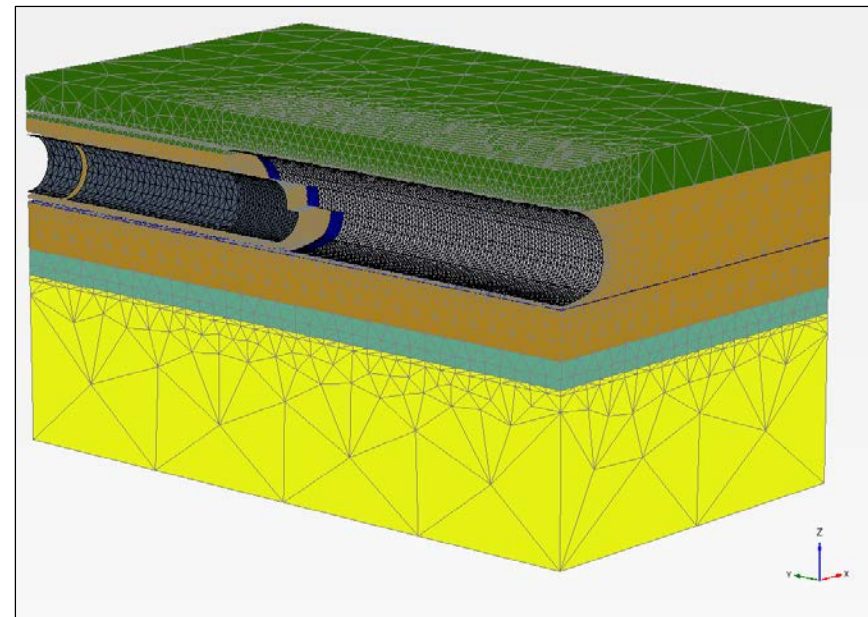
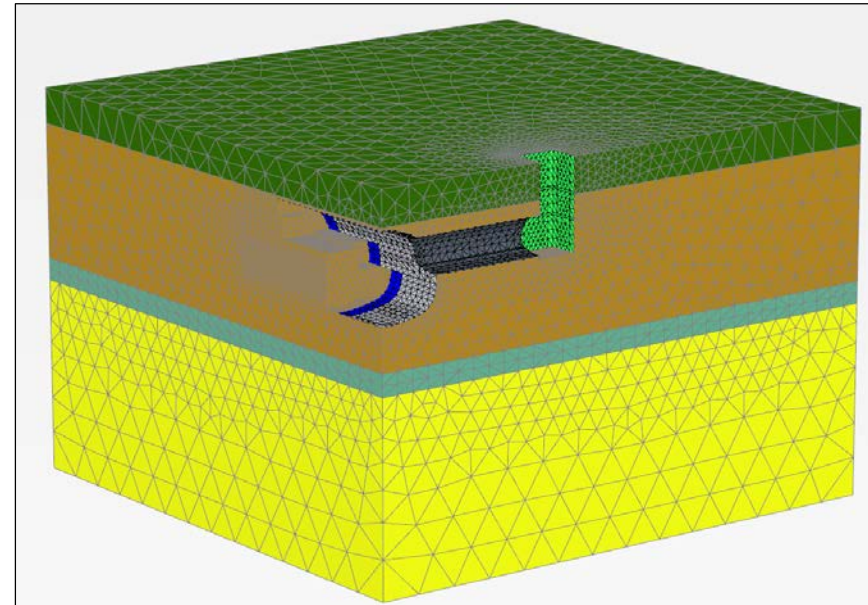


Desacoplamiento de modelos complejos

Un modelo muy complejo puede partirse en dos o mas

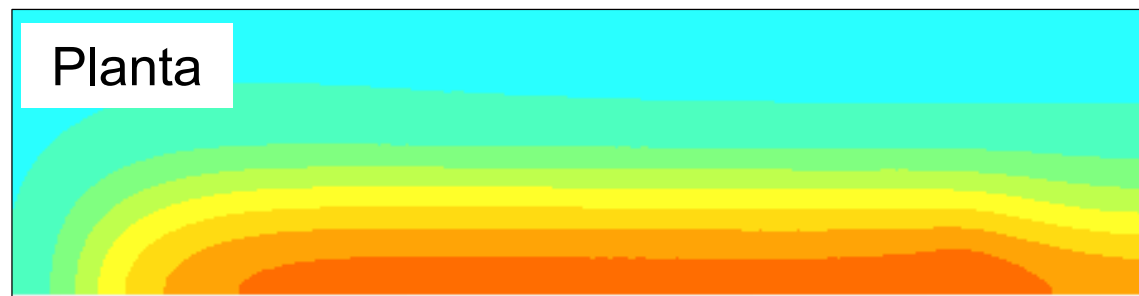
- Obras tempranas, sólo en un punto de la caverna
- Modelo de procedimiento constructivo de caverna (aprovecha simetrías)

El asentamiento informado es la suma de los resultados de los dos modelos por separado

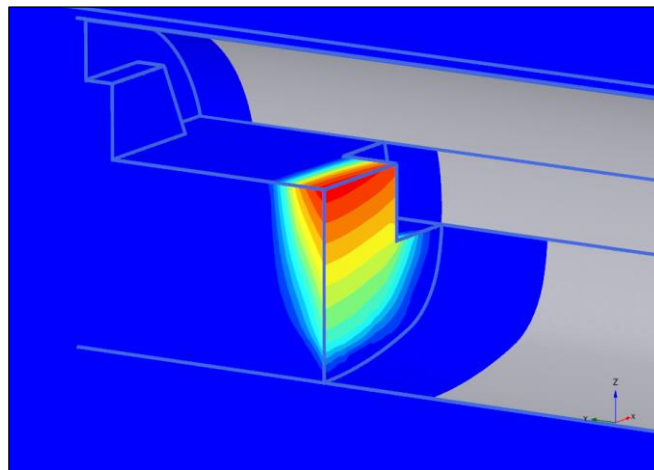


Modelo de un procedimiento constructivo

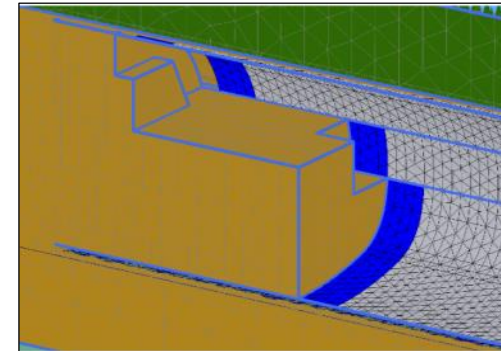
Mapa 3D de desplazamientos del terreno en función del avance de la excavación



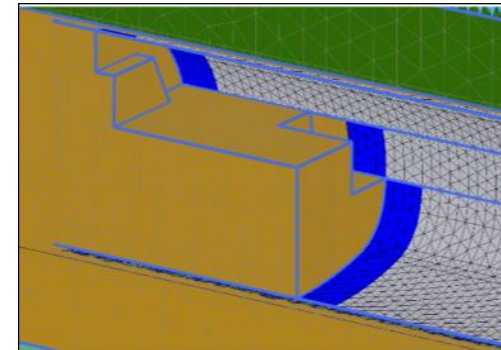
Cálculo de factor de seguridad en cualquier etapa e identificación de puntos débiles del procedimiento



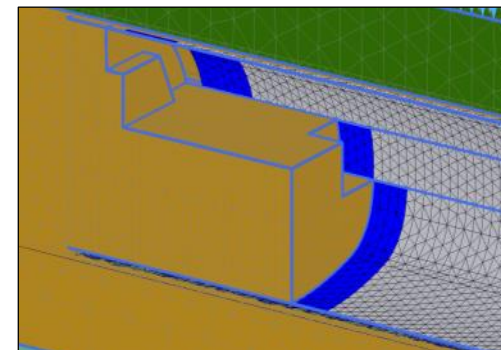
Exc. bóveda



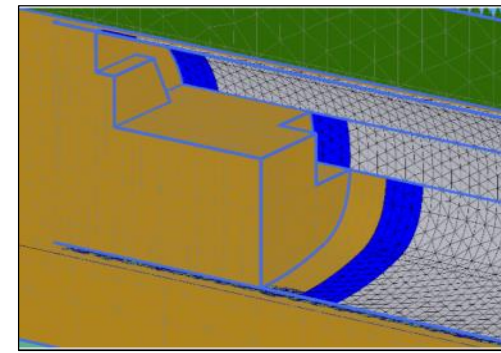
Hº. bóveda



Exc. bóveda

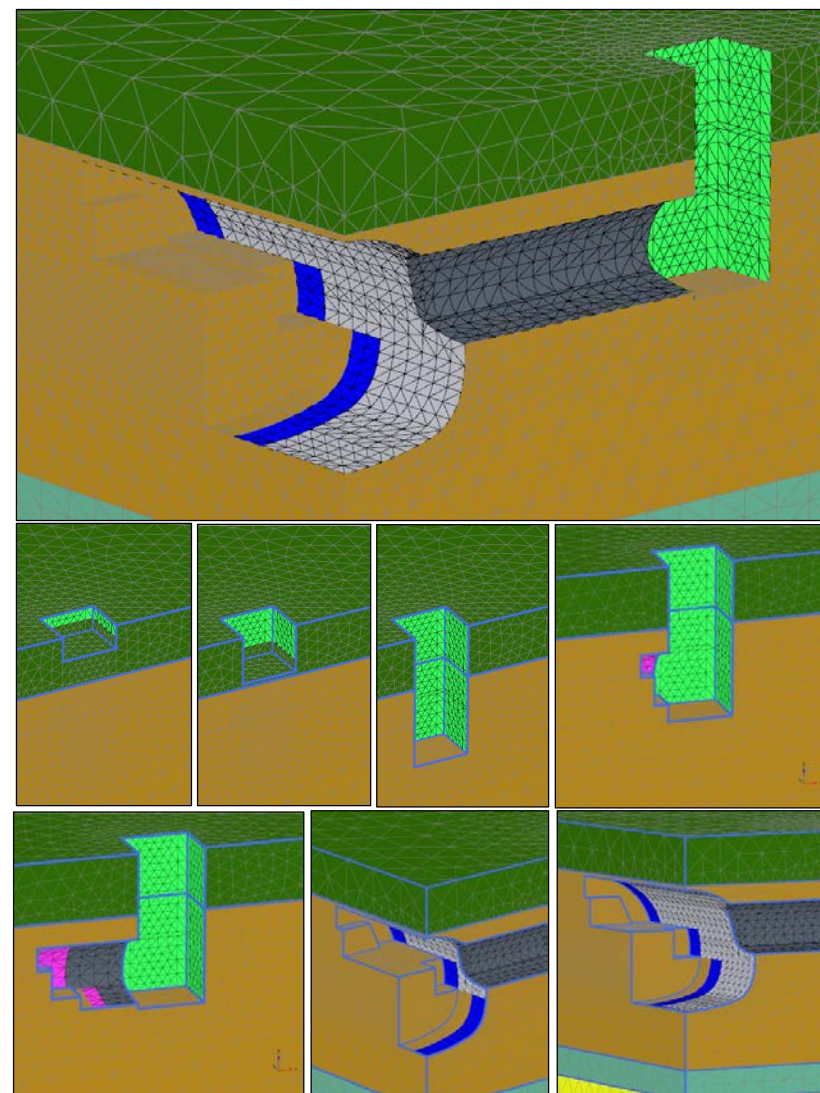


Exc. solera



Ejemplo: modelo de secuencia de obras tempranas

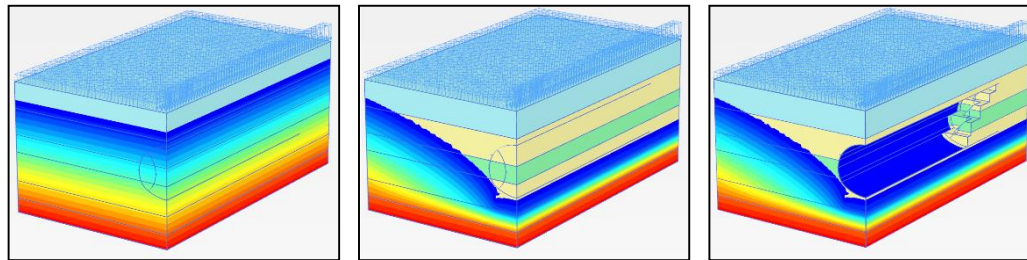
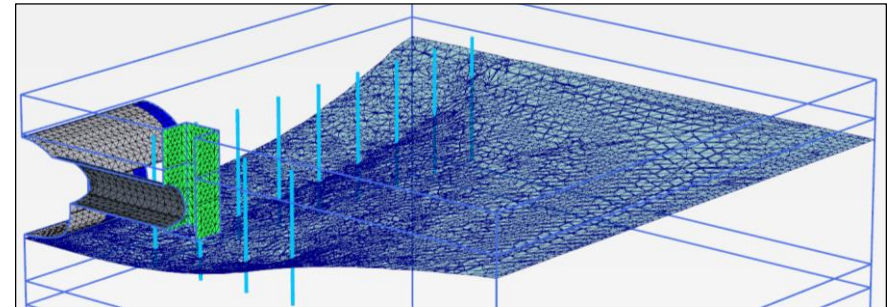
- Abatimiento del nivel freático
- Excavación del pozo de ataque
- Excavación de galería de acceso
- Apertura manual de bóveda
- Desarrollo de frente de excavación hasta configuración típica



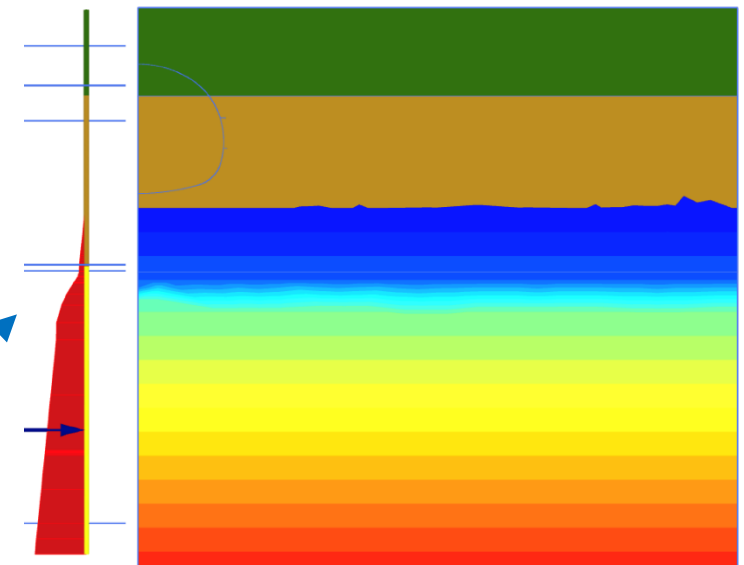
Flujo de agua

El flujo de agua en 3D debe quedar bien simulado (no es intuitiva su influencia)

- Estabilidad de frente y fondo
- Asentamientos inducidos
- Efecto de interrupción de abatimiento



Gradiente de presión que desestabiliza el fondo del túnel



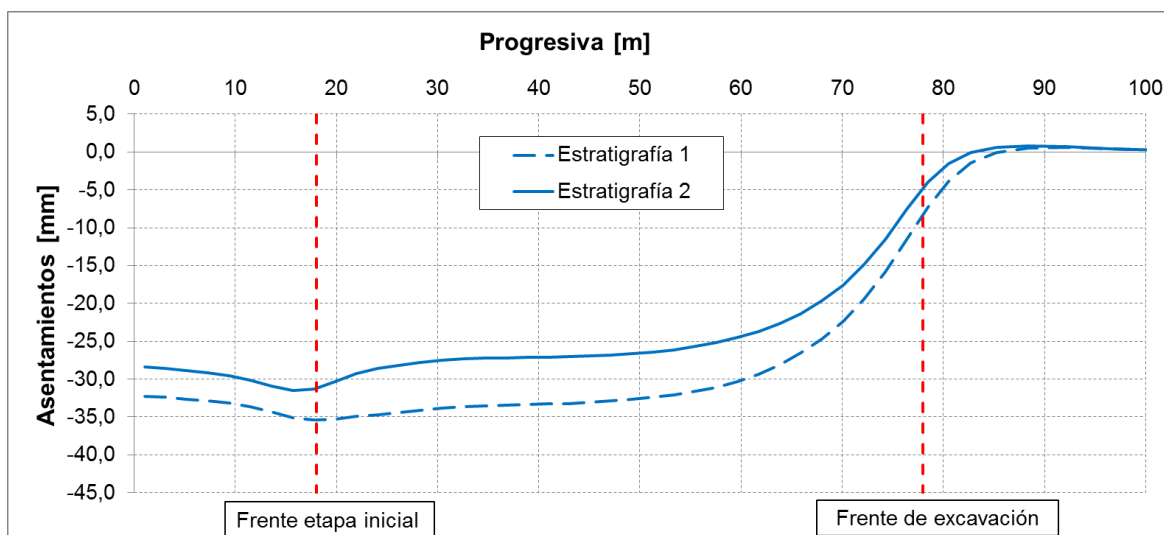
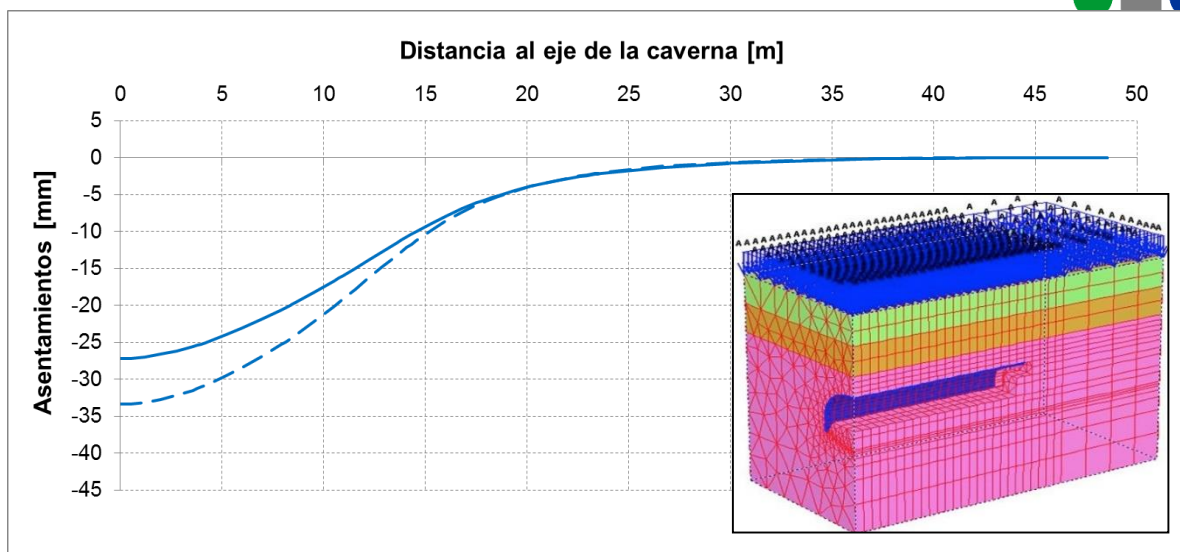
Control de calidad del resultado

Ancho correcto

- Asentamiento cero en el borde lateral

Longitud correcta

- Asentamiento estable en centro
- Asentamiento nulo en borde anterior

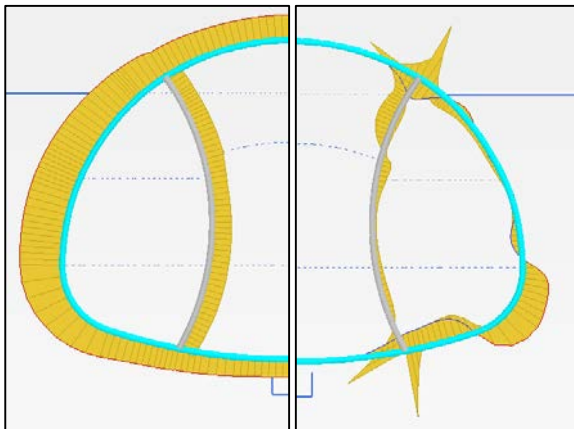


Solicitaciones estructurales en los modelos 3D

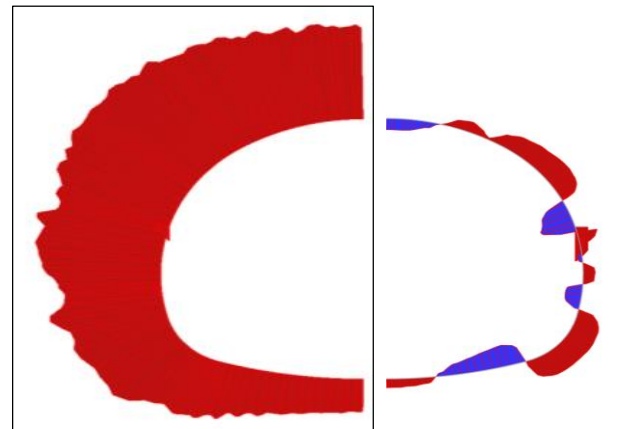
Elementos placa: solicitaciones menos confiables

- Menor calidad numérica (menos nodos)
- Menos elementos (mallas más gruesas que 2D)
- Sección transversal no intercepta puntos de integración

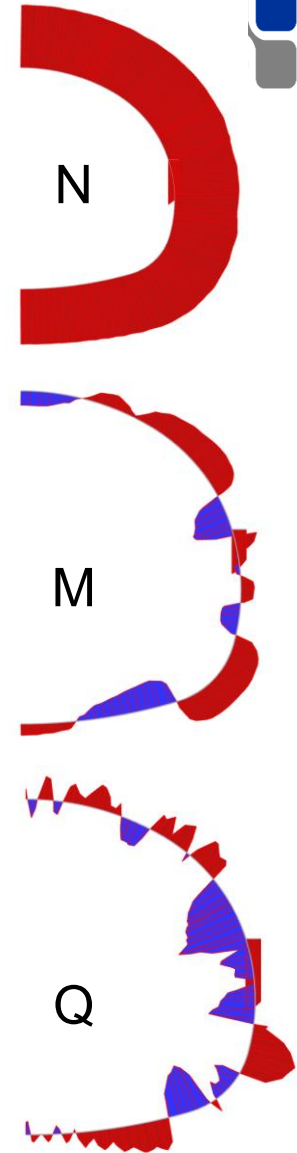
Diseñe el sostenimiento con modelos 2D



Modelo 2D



Modelo 3D



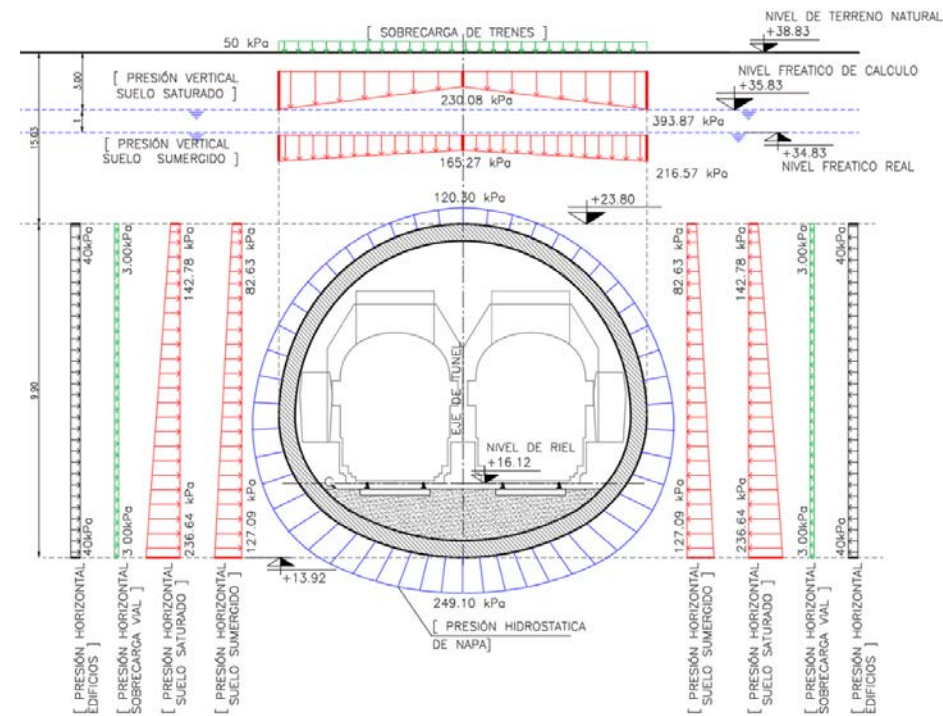
N

M

Q

Contenido

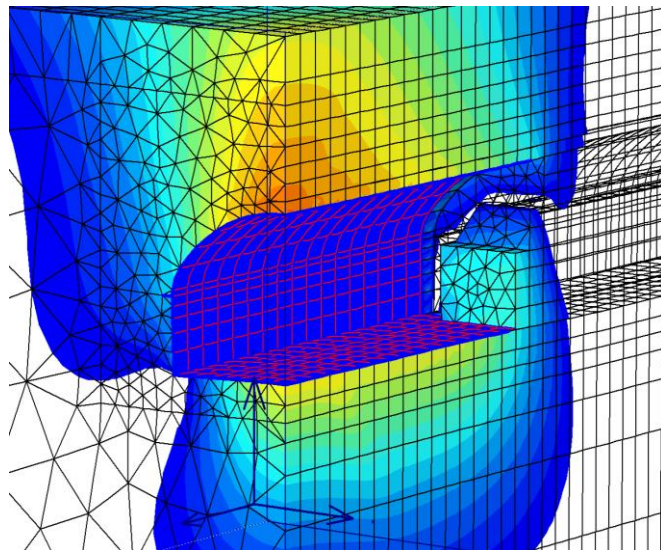
- Procedimientos constructivos para túneles de frente abierto
- Simulación de procedimientos constructivos
- Diseño del revestimiento definitivo
- Ejemplo: El túnel Mujer Urbana
- Resumen



Modelos geomecánicos vs modelos estructurales para túneles

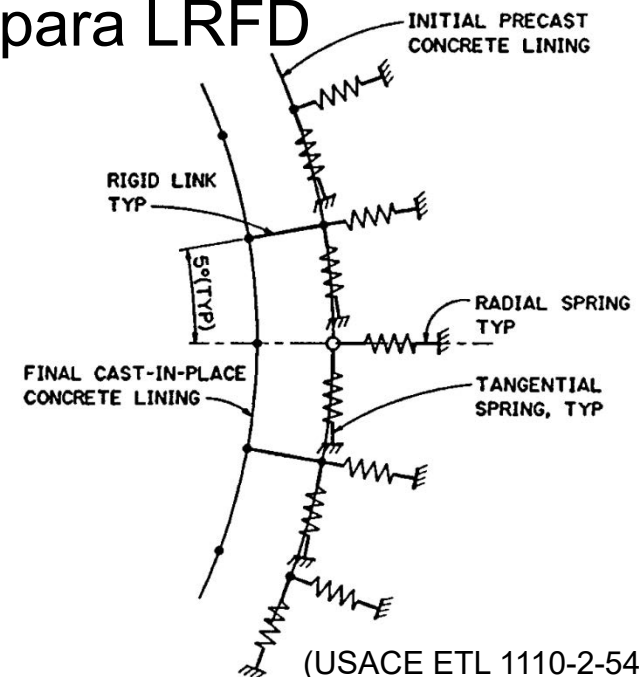
Modelos geomecánicos

- El terreno es un sólido
- (Casi) no se puede separar el efecto de diferentes acciones



Modelos de resortes

- Terreno: cargas y resortes
- **Aplicable si $\beta = \frac{E_s R^3}{EJ} < 200$**
- Apto para LRFD

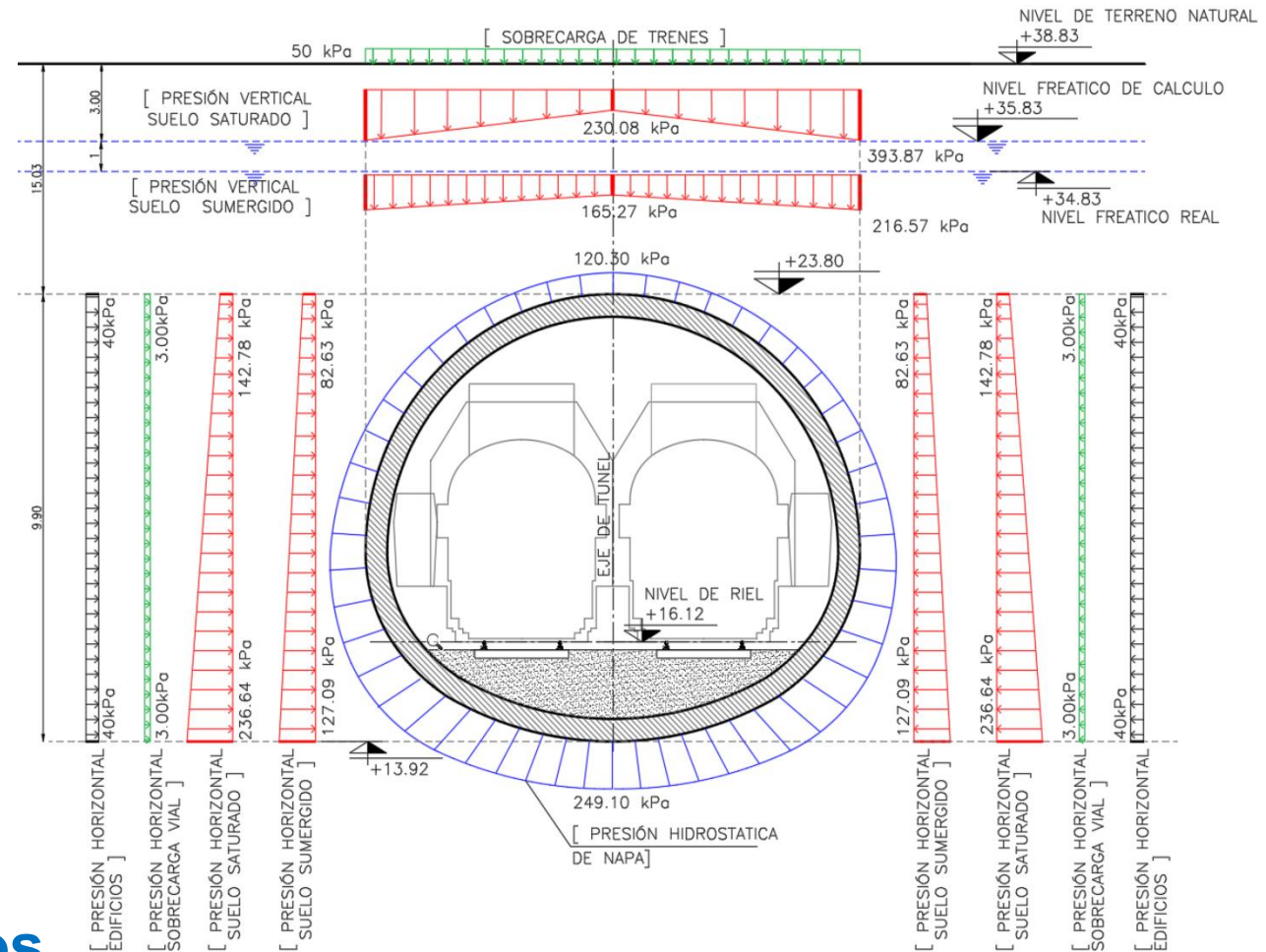


Las “cargas” en un modelo de resortes

Estado tensional previo al túnel

- (Se asume que)
Los resortes simulan el “efecto arco”
- No tiene en cuenta el procedimiento constructivo

Las cargas son fuerzas en los nodos



El efecto de la forma

Los modelos de barras capturan el efecto de forma

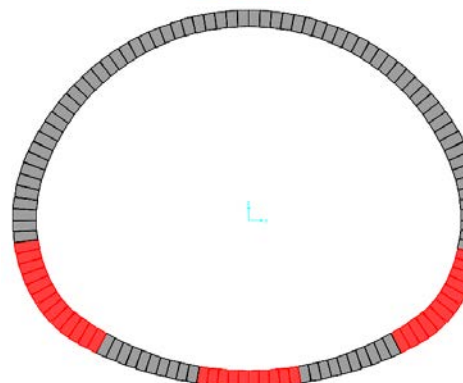
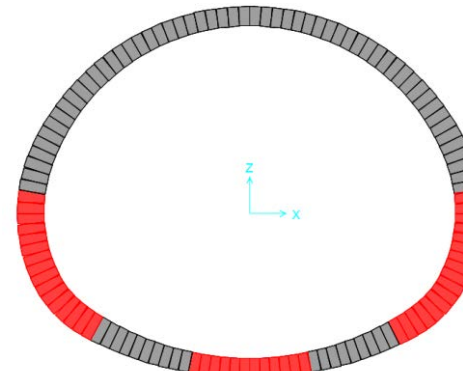
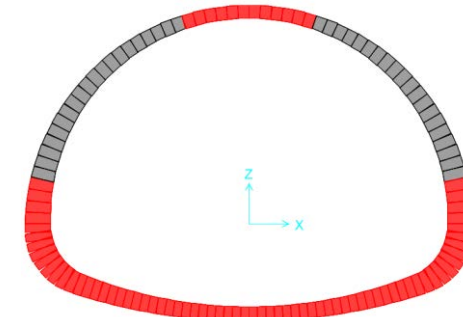
- Optimización estructural
- Posición de juntas
- Calidad de hormigón

La forma óptima no es la que minimiza la estructura

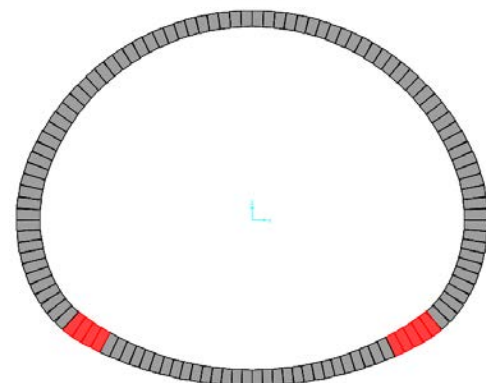
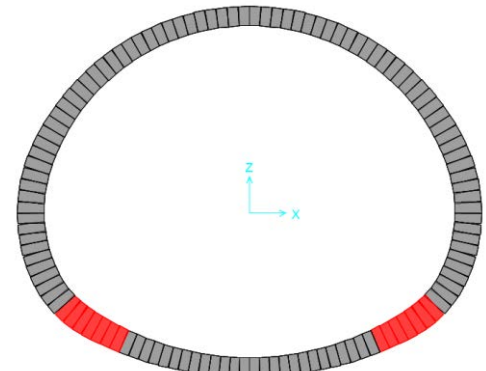
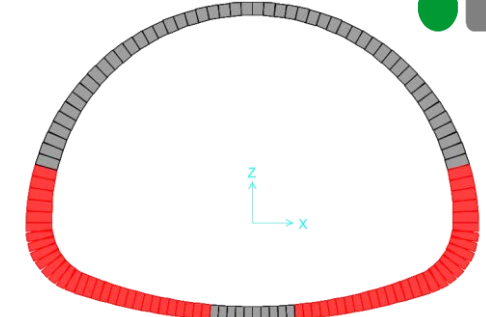
- Volumen de excavación
- Encofrado de solera
- Tránsito por la solera

srk

Armadura
de flexión



Armadura
de corte



La constante de resorte

Resortes radiales

- Vesic
- Duddeck & Erdmann
- USACE

$$k_R = \frac{E_s}{2R(1-\nu^2)} \quad k_R = \frac{E_s}{R} \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

$$k_R = \frac{E_s}{R(1+\nu)}$$

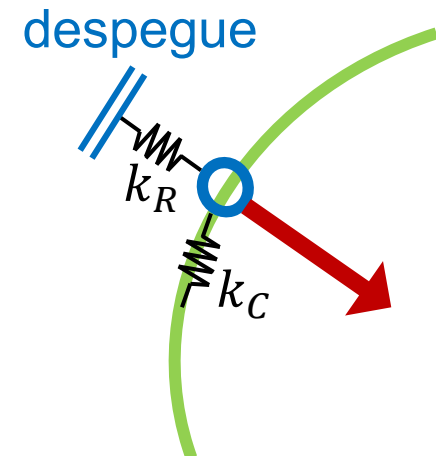
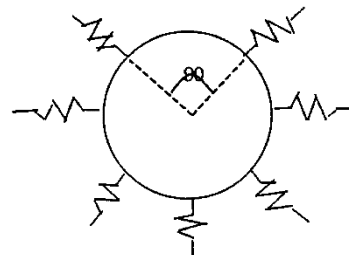
Resortes circunferenciales

- Dixon
- USACE

$$0.2k_R < k_C < 0.5k_R$$

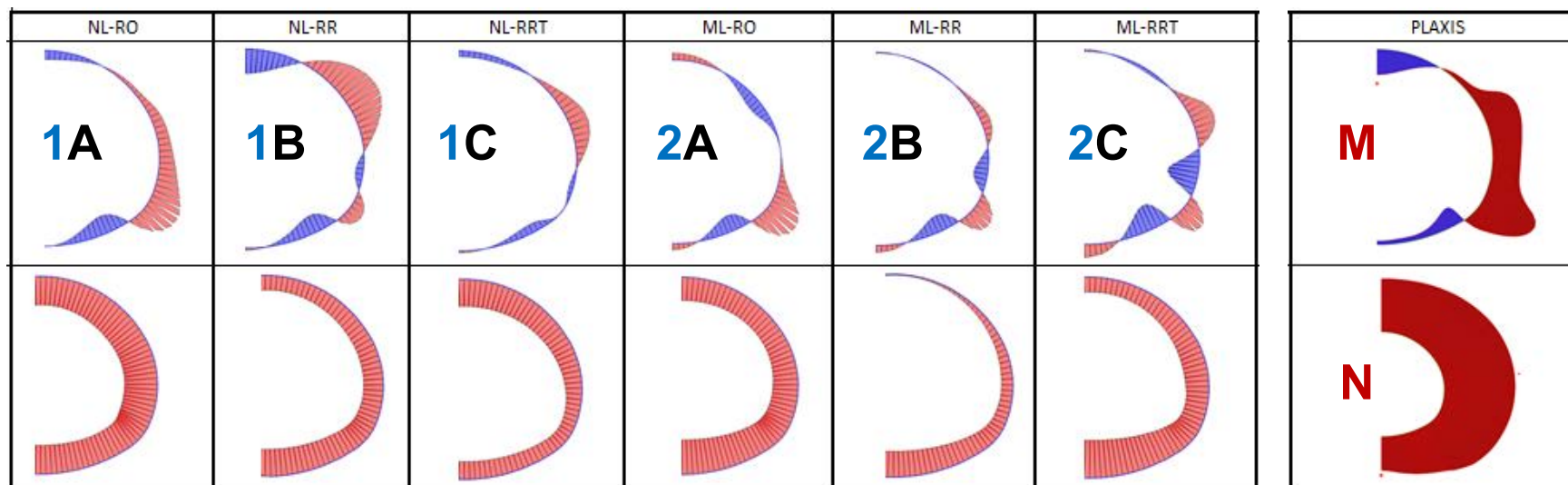
$$k_C = 0.5k_R/(1+\nu)$$

**Resortes con despegue,
o la regla de las 10 y 10**



Validación de modelos de resortes

Error respecto de FEM (A_{calc}/A_{FEM})	1: Con despegue			2: Sin despegue		
	M_C	M_H	N_C	M_C	M_H	N_C
A: Verticales = horizontales	3.66	3.43	1.51	-0.73	-0.24	0.63
B: Radiales únicamente	9.60	7.72	1.38	-0.10	0.72	0.05
C: Radiales = circunferenc.	2.29	5.60	1.59	-0.08	0.87	0.35



Resortes circunferenciales con rigidez reducida

$k_C < k_R$ ayuda a que los modelos lineales tengan diagramas con el mismo signo que el modelo FEM

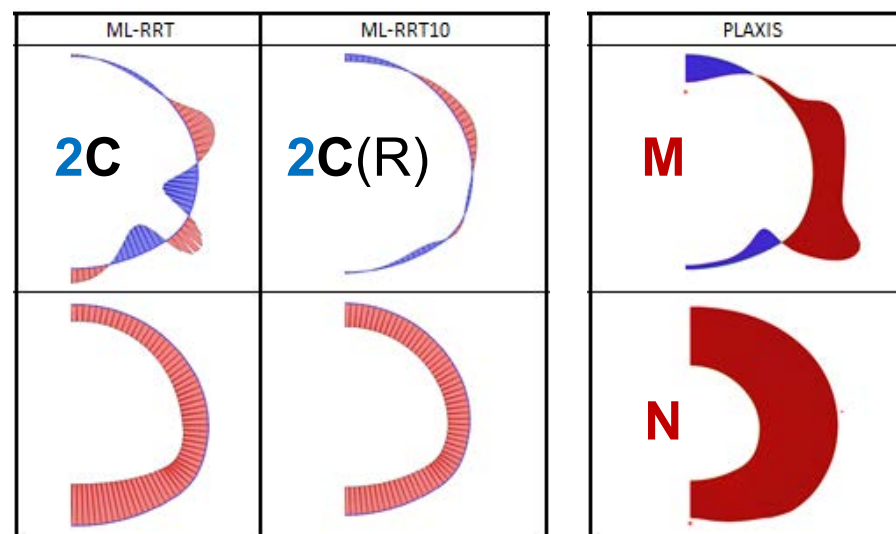
Recomendación (NATM)

- Modele con resortes verticales y horizontales con $k_v = k_h = k_R$
- Modele con resortes radiales y circunferenciales con $k_C = 0.5 k_R / (1 + \nu)$
- Dimensione para la envolvente de ambos modelos

	ML-RRT			ML-RRT10			PLAXIS	ERR MIN
	Valor	Signo	ERR	Valor	Signo	ERR	CONTROL	
A	-3.48	NC		263.21	C	5.39	41.18	1.28
B	6.81	NC		-57.74	C	10.55	-5.00	2.72
C	-12.02	C	0.73	-398.14	C	7.84	-45.06	0.67
D	-48.26	C	0.13	-439.43	C	6.94	-55.37	0.13
E	27.02	NC		-78.69	C	0.63	-48.23	0.63
F	11.67	NC		-64.19	C	0.38	-103.20	0.33
G	52.80	C	0.69	226.06	C	6.22	31.31	0.69
H	-27.09	NC		-31.97	NC		6.05	0.58
	2.00	NA	ML-RRT	1.00	NA	ML-RRT10		

C: Coincide el signo.

NC: No coincide el signo.

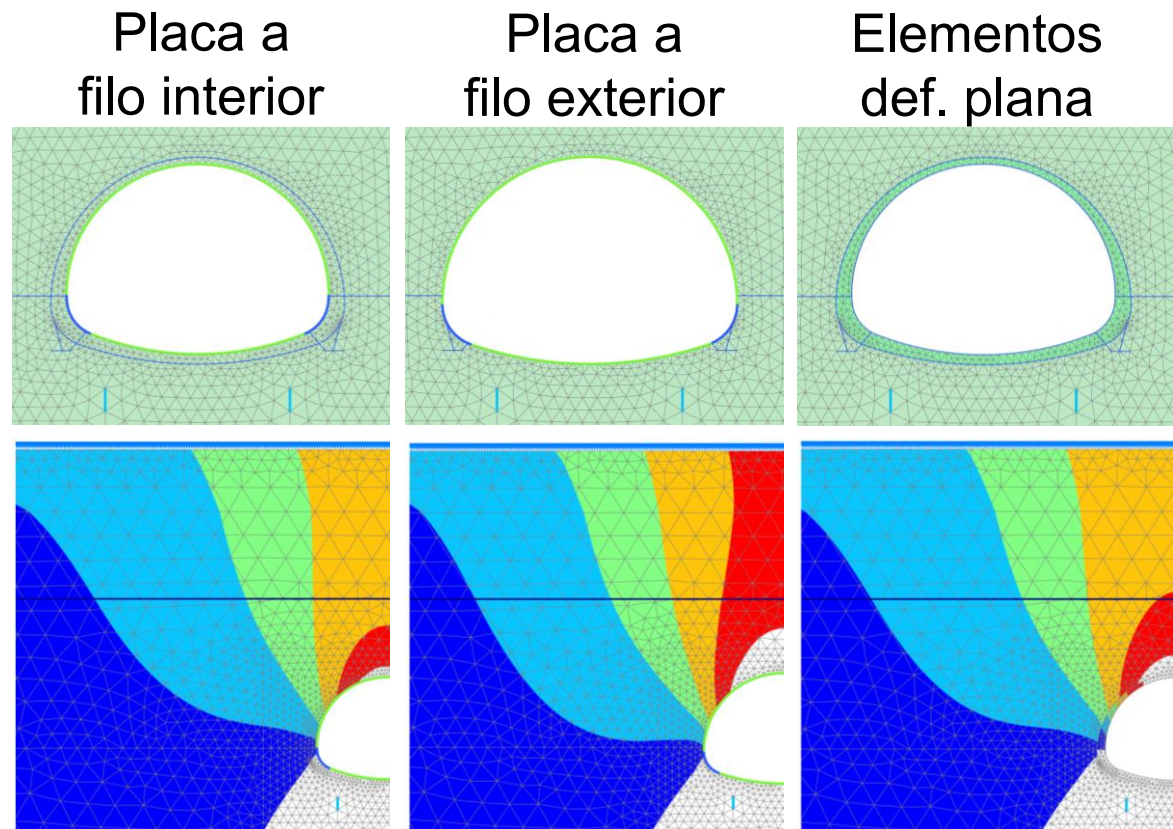


Modelización del revestimiento definitivo con FEM

El sostenimiento primario y el revestimiento secundario tienen ejes en posiciones diferentes

Las diferencias son significativas

- ¿dos mallas?
- ¿placas a eje de uno de los dos?
- ¿Revestimiento secundario con elementos de def. plana?

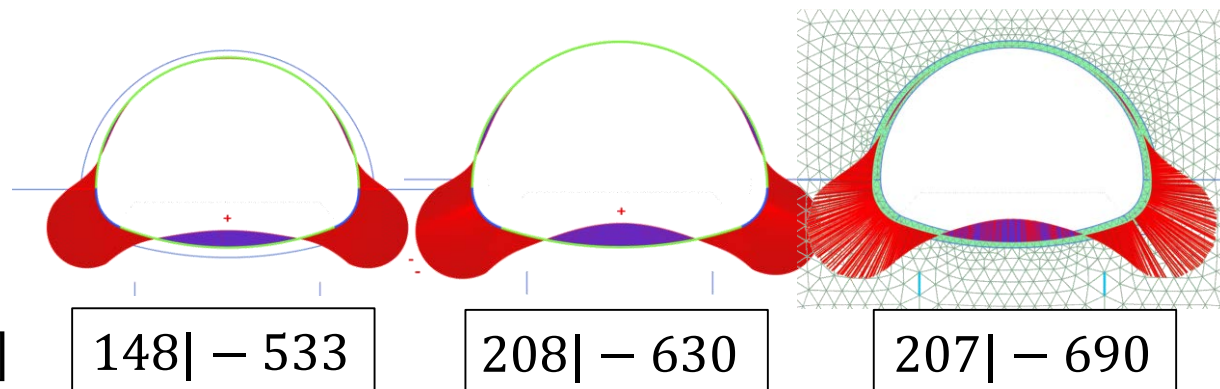
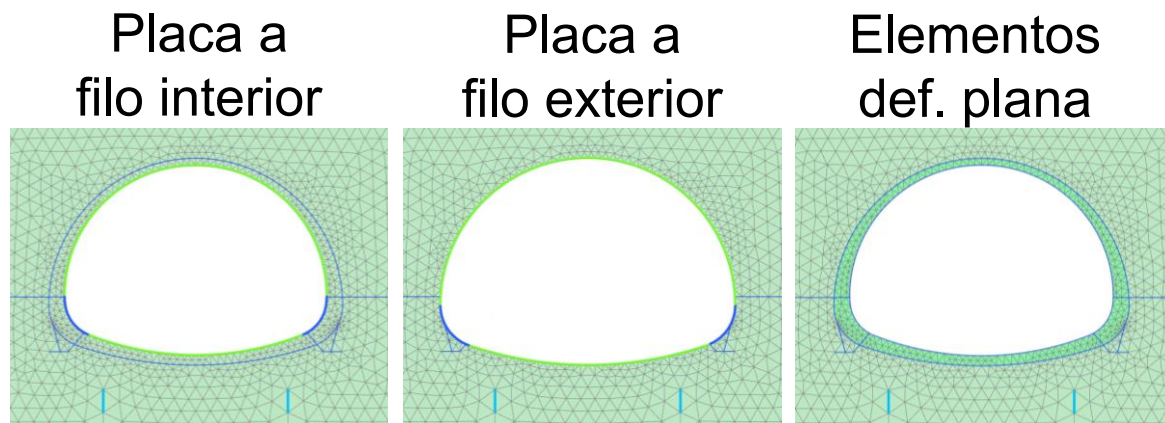


Modelización del revestimiento definitivo con FEM

El sostenimiento primario y el revestimiento secundario tienen ejes en posiciones diferentes

Las diferencias son significativas

- ¿dos mallas?
- ¿placas a eje de uno de los dos?
- ¿Revestimiento secundario con elementos de def. plana?



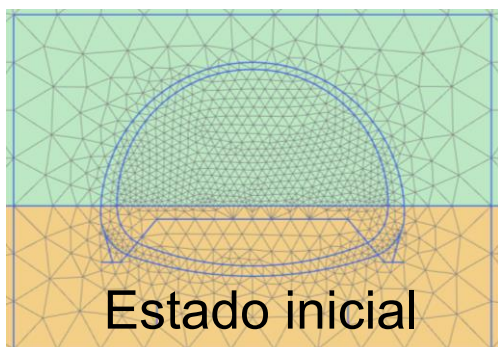
M [kNm]

148 | - 533

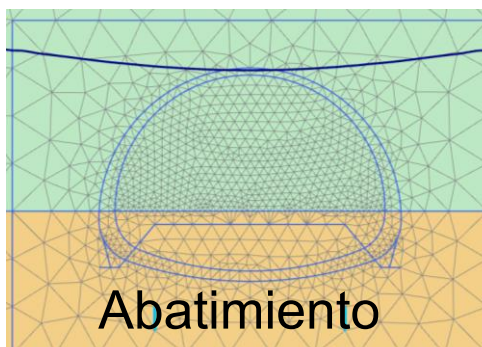
208 | - 630

207 | - 690

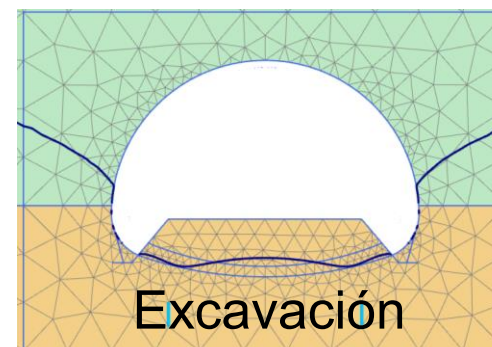
Revestimiento secundario con elementos de deformación plana



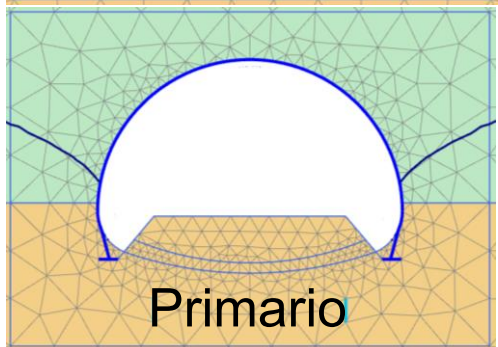
Estado inicial



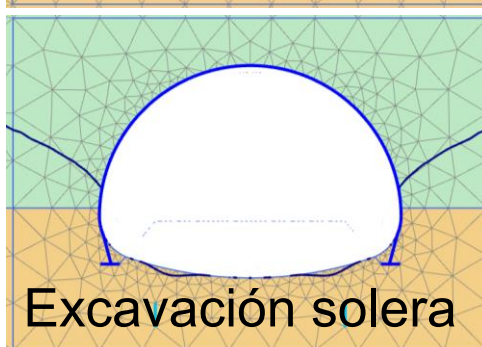
Abatimiento



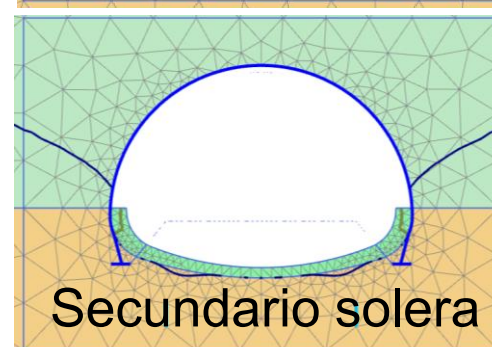
Excavación



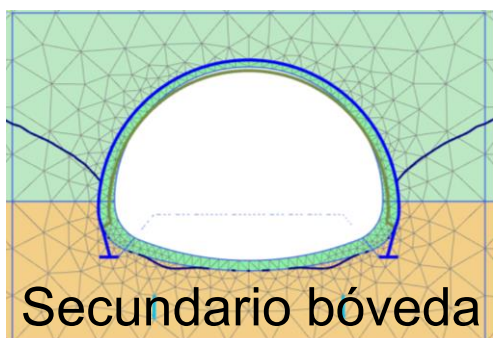
Primario



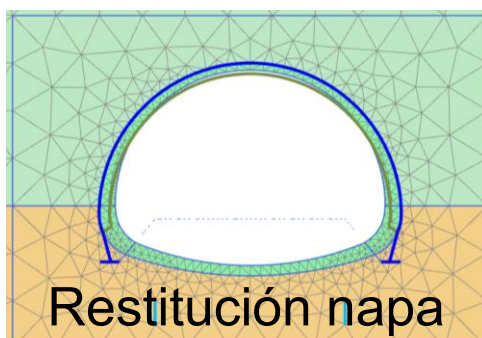
Excavación solera



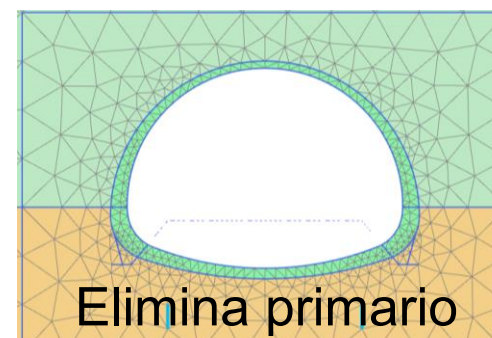
Secundario solera



Secundario bóveda



Restitución napa



Elimina primario

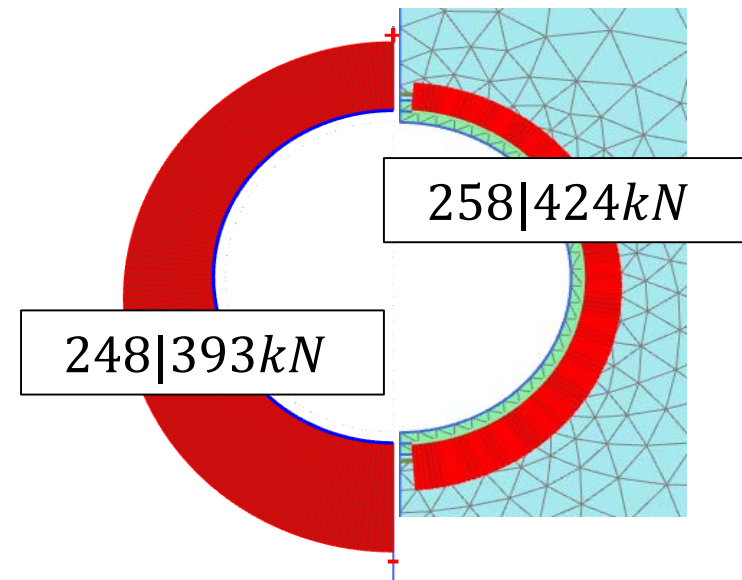
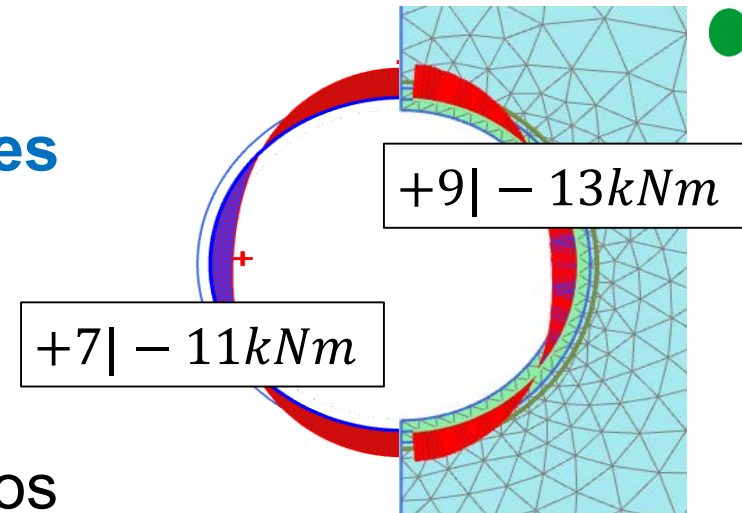
Solicitaciones con elementos de deformación plana

Para obtener **solicitaciones similares** entre elementos estructurales y elementos de deformación plana

- Placas a eje de estructura
- Malla muy fina en elementos sólidos

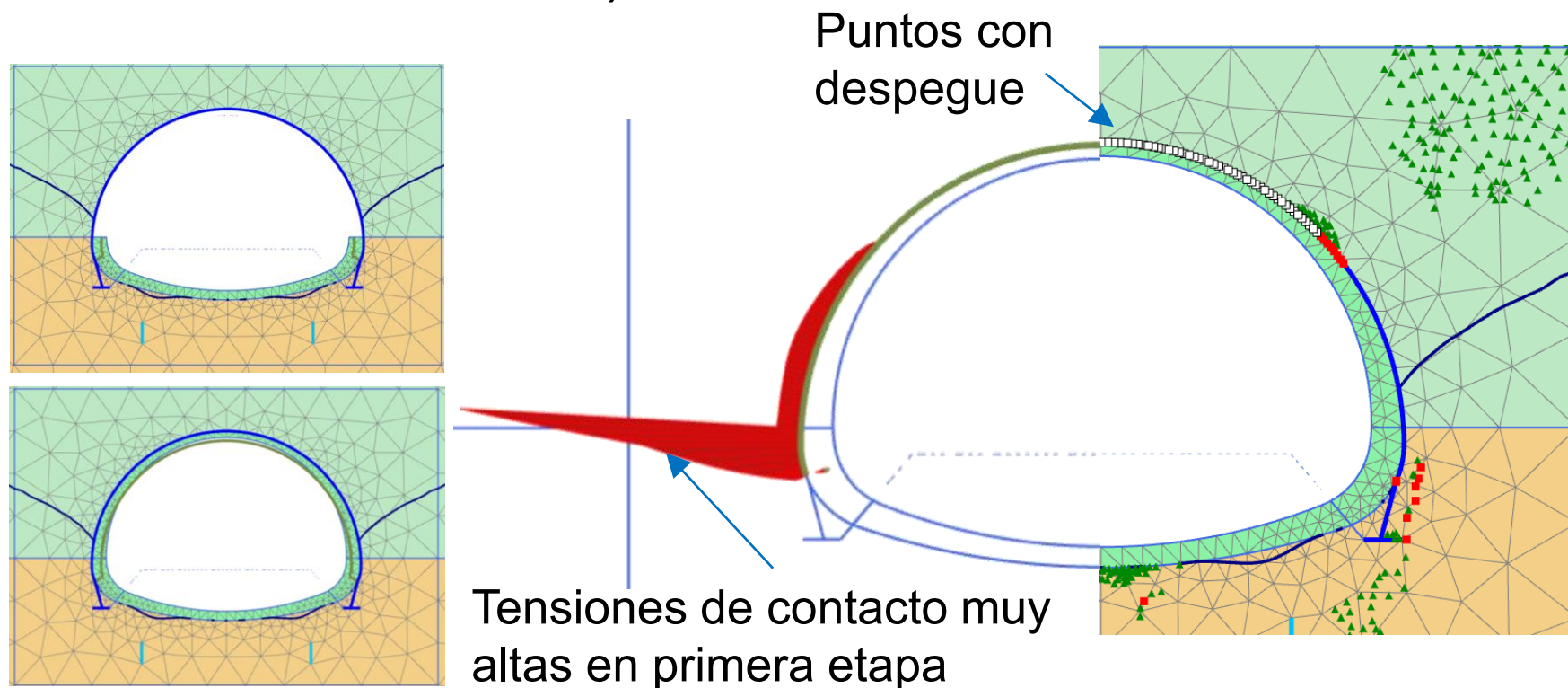
Es imposible la igualdad exacta

- Placas: teoría de Kirkchoff
- Def. plana: integración numérica (incluye deformaciones por corte y errores de integración)
- No puede hacerse en 3D (aún)



El despegue del revestimiento secundario en bóveda

Si se activan interfases, **el revestimiento secundario se despega del sostenimiento primario en la bóveda** (esto ocurre en la realidad)

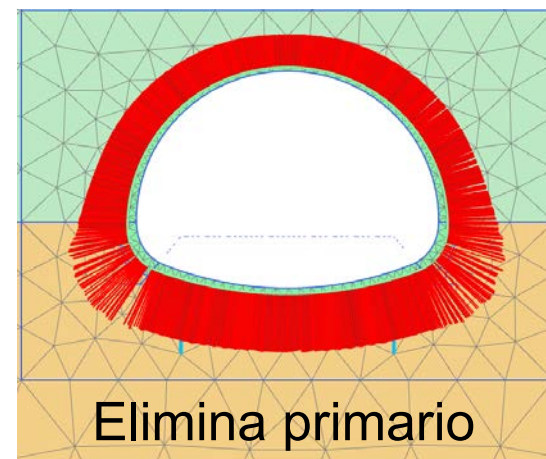
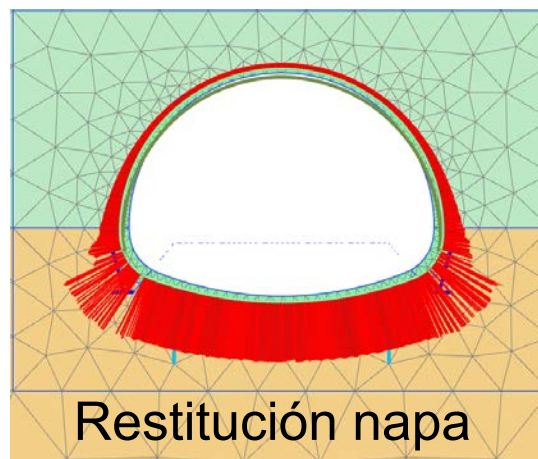
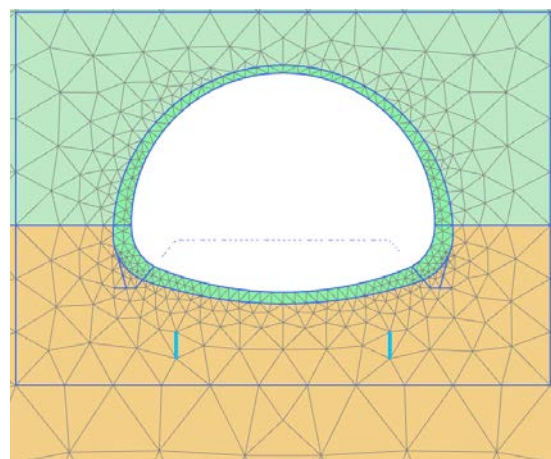
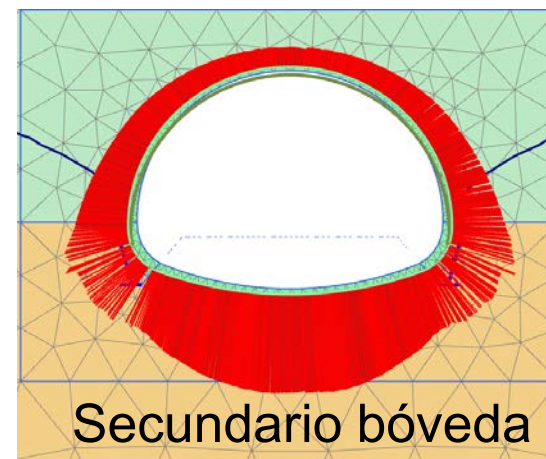
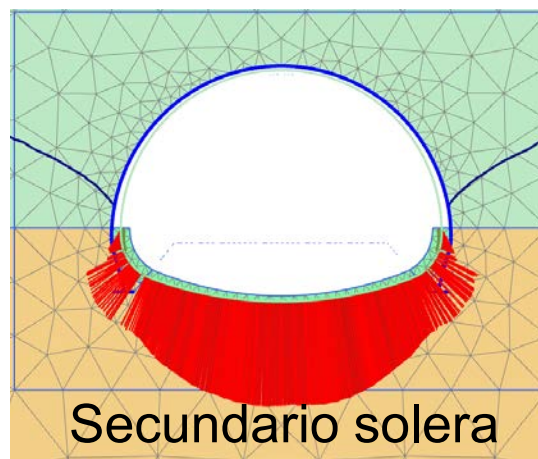


Tensiones de contacto muy altas en primera etapa

Puntos con despegue

La “eliminación” del sostenimiento primario

Rev. secundario con elementos def. plana permite **“eliminar” el sost. primario: análisis largo plazo**



Contenido

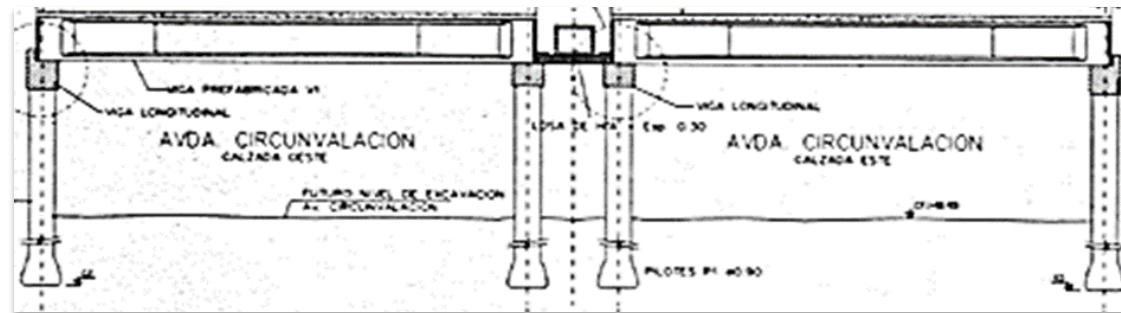
- Procedimientos constructivos para túneles de frente abierto
- Simulación de procedimientos constructivos
- Diseño del revestimiento definitivo
- Ejemplo: El túnel Mujer Urbana
- Resumen



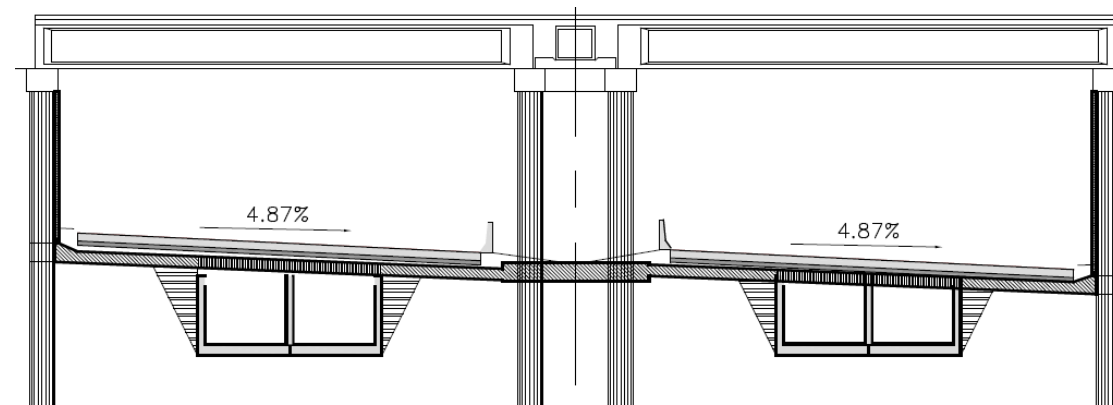
Planteo del problema

Cruce de tres niveles, circunvalación Córdoba

- Estructura del túnel construida años atrás



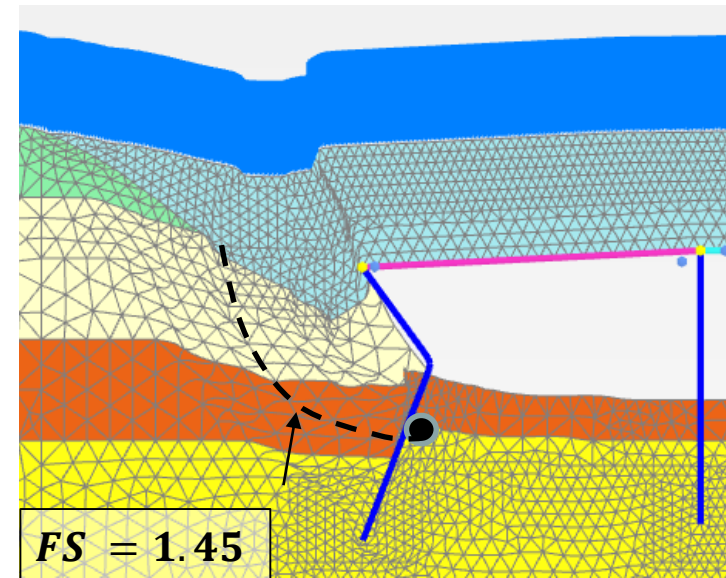
- Se agregaron conductos pluviales grandes



Planteo del problema

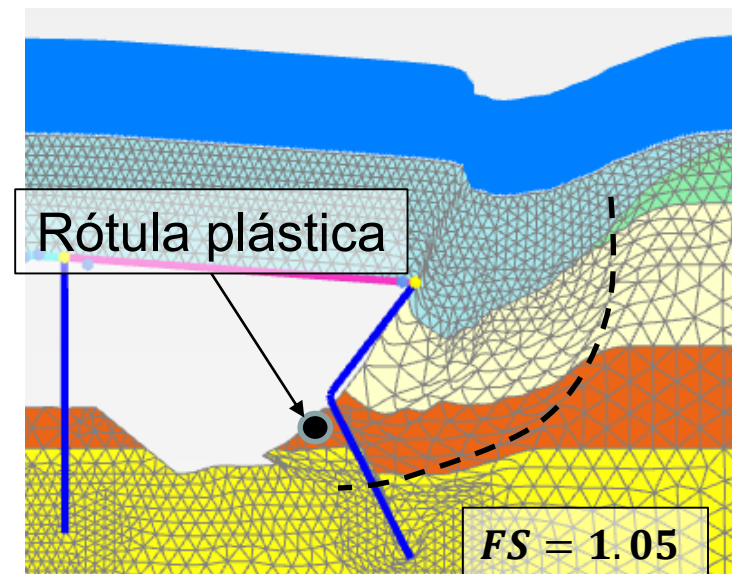
Diseño original:

- Los pilotes tenían suficiente reserva estructural para permitir la excavación del túnel

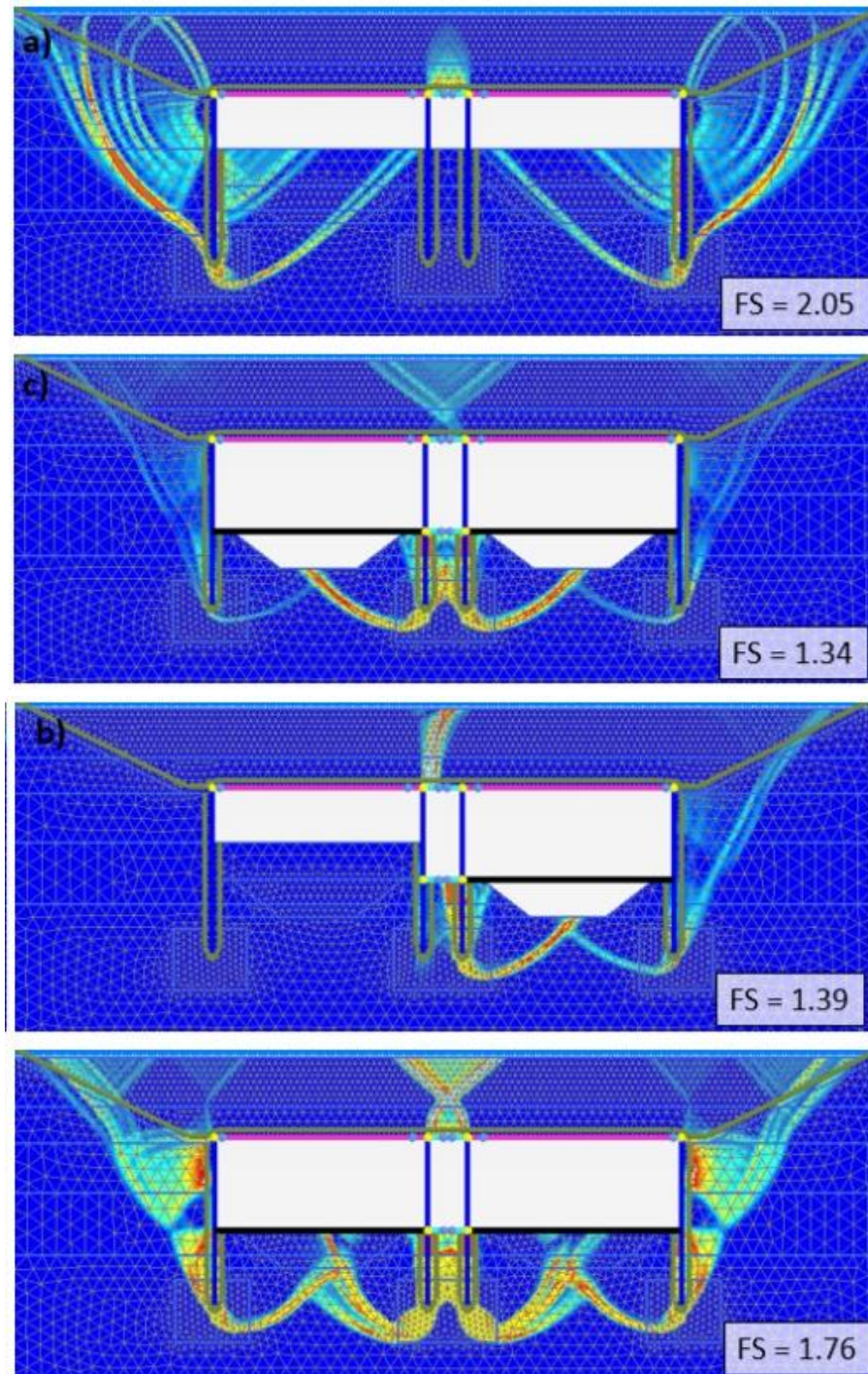
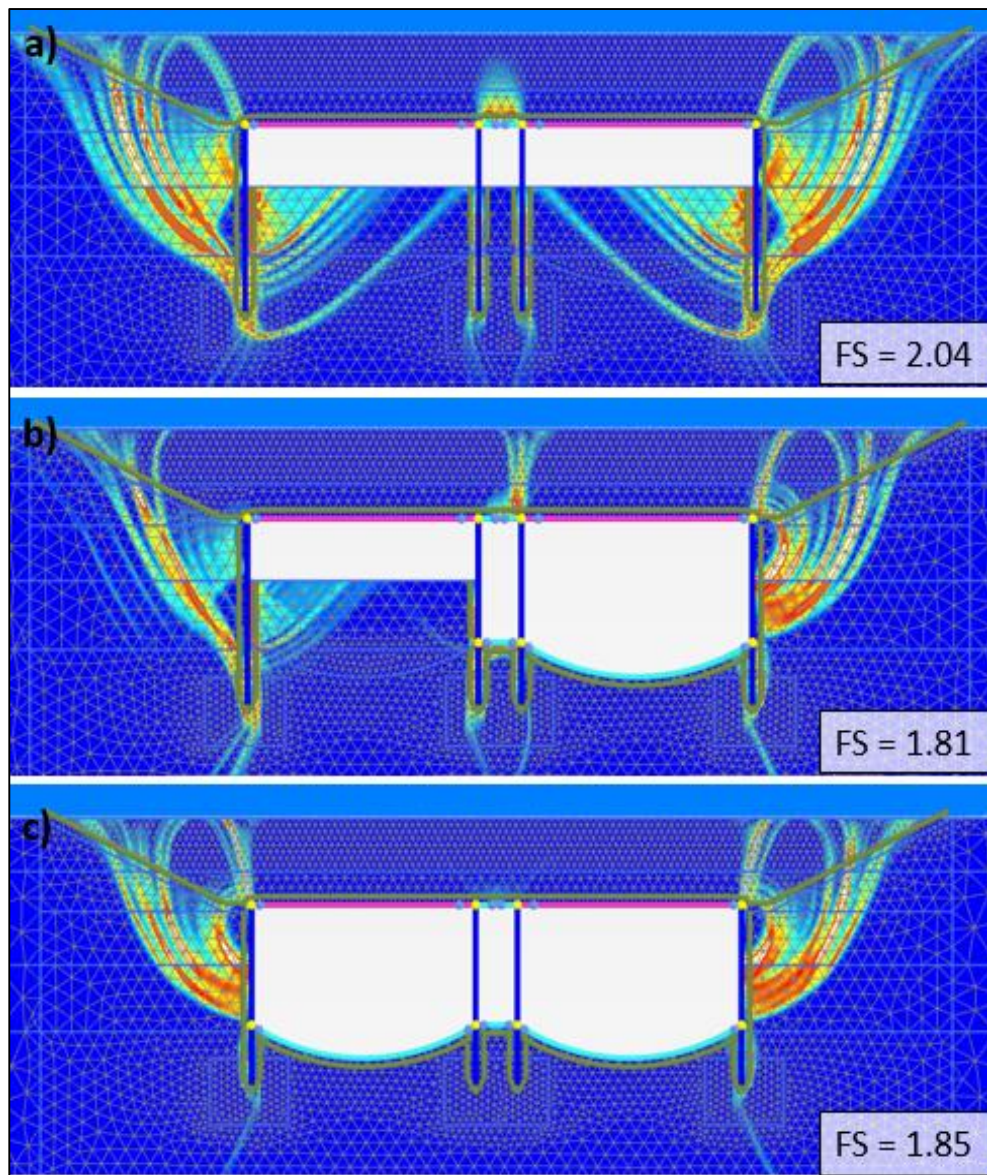


Cuando se agregan los conductos

- Aumenta la longitud libre de los pilotes
- Disminuye su empotramiento
- El procedimiento constructivo debe cambiar por falta de capacidad vertical y lateral

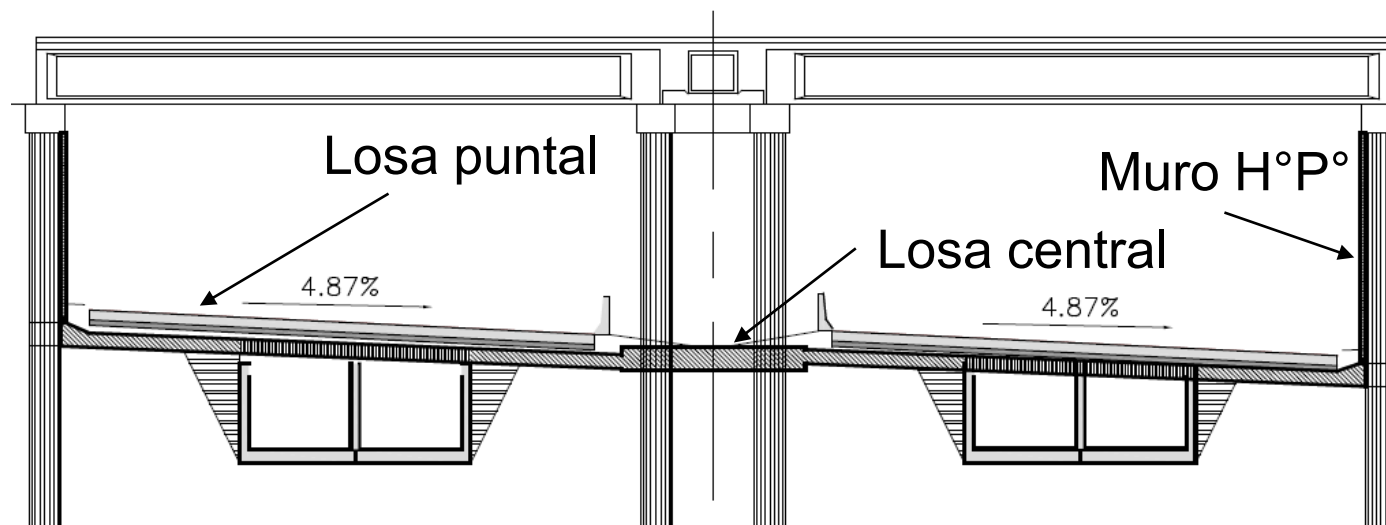


Opciones



Solución implementada

- Flexión en pilotes: muro de hormigón proyectado
- Capacidad de carga pilotes laterales: zapata bajo muro lateral
- Capacidad de carga pilotes centrales: losa central
- Empujes: losa punta en todo el ancho del túnel



Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro H° proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos



Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro H° proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos



Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro H° proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos



Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro H° proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos



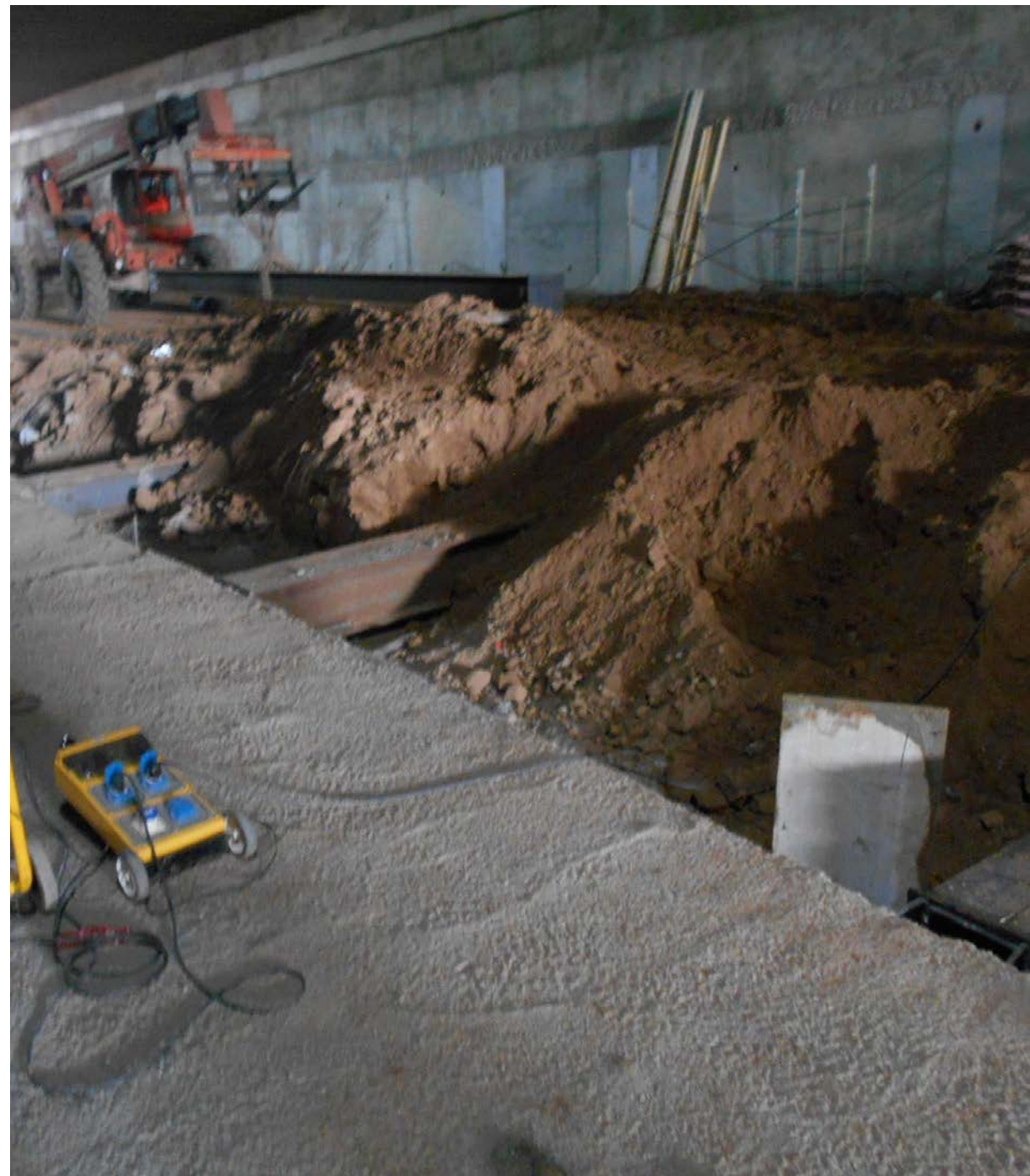
Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro H° proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos

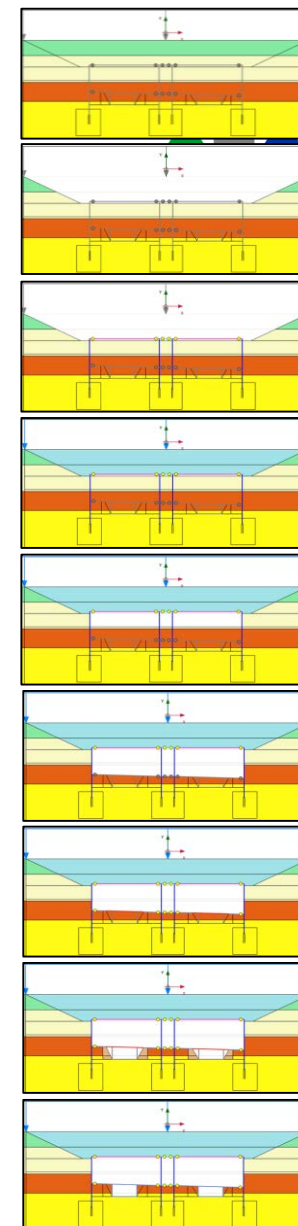
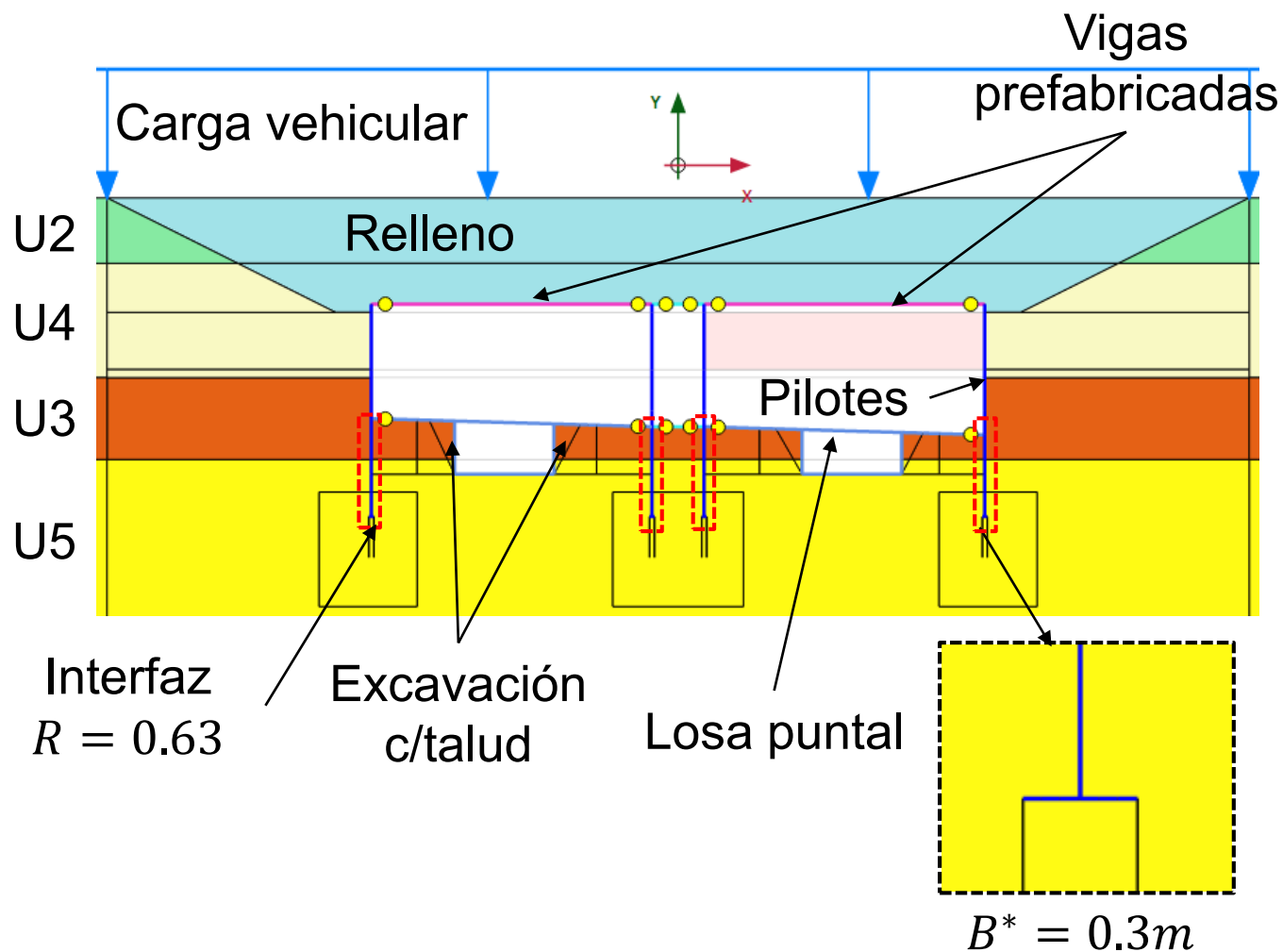


Procedimiento constructivo

- Excavación masiva 3.5 m
- Refuerzo de muros laterales
- Excavación por franjas 4 m
- Muro proyectado
- Hormigonado de losas y vigas
- Repite...
- Construcción conductos

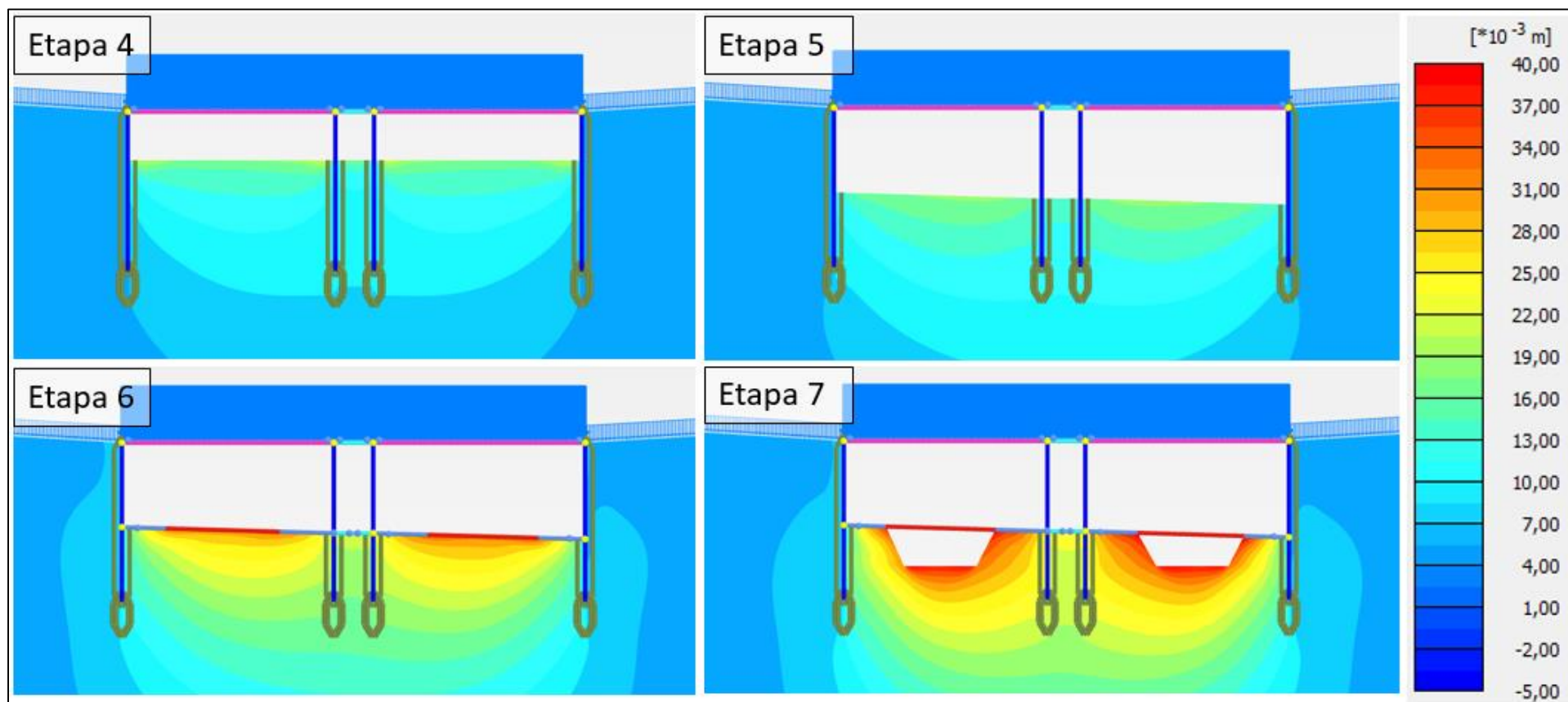


Modelo 2D: configuración y etapas

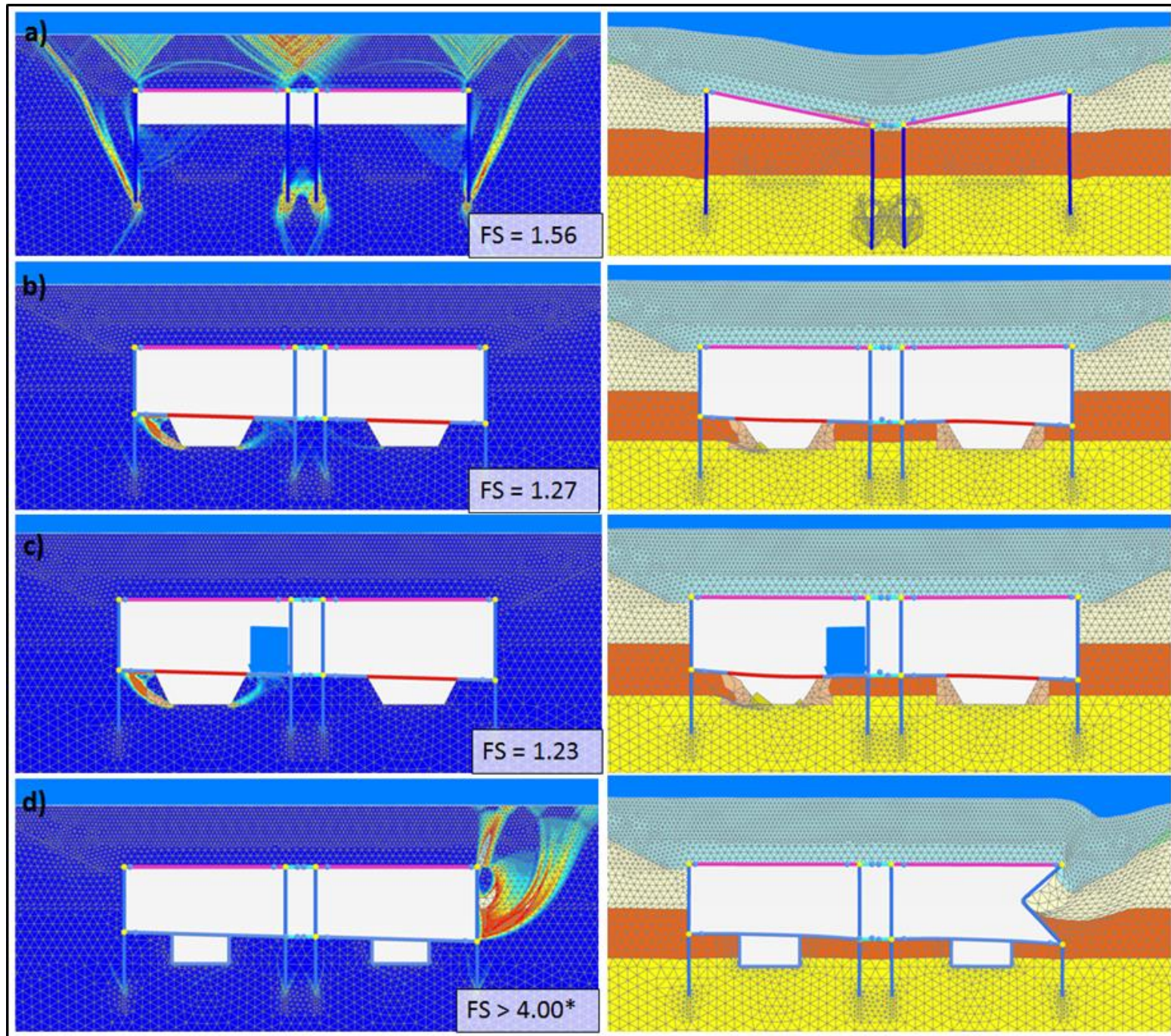


Desplazamientos

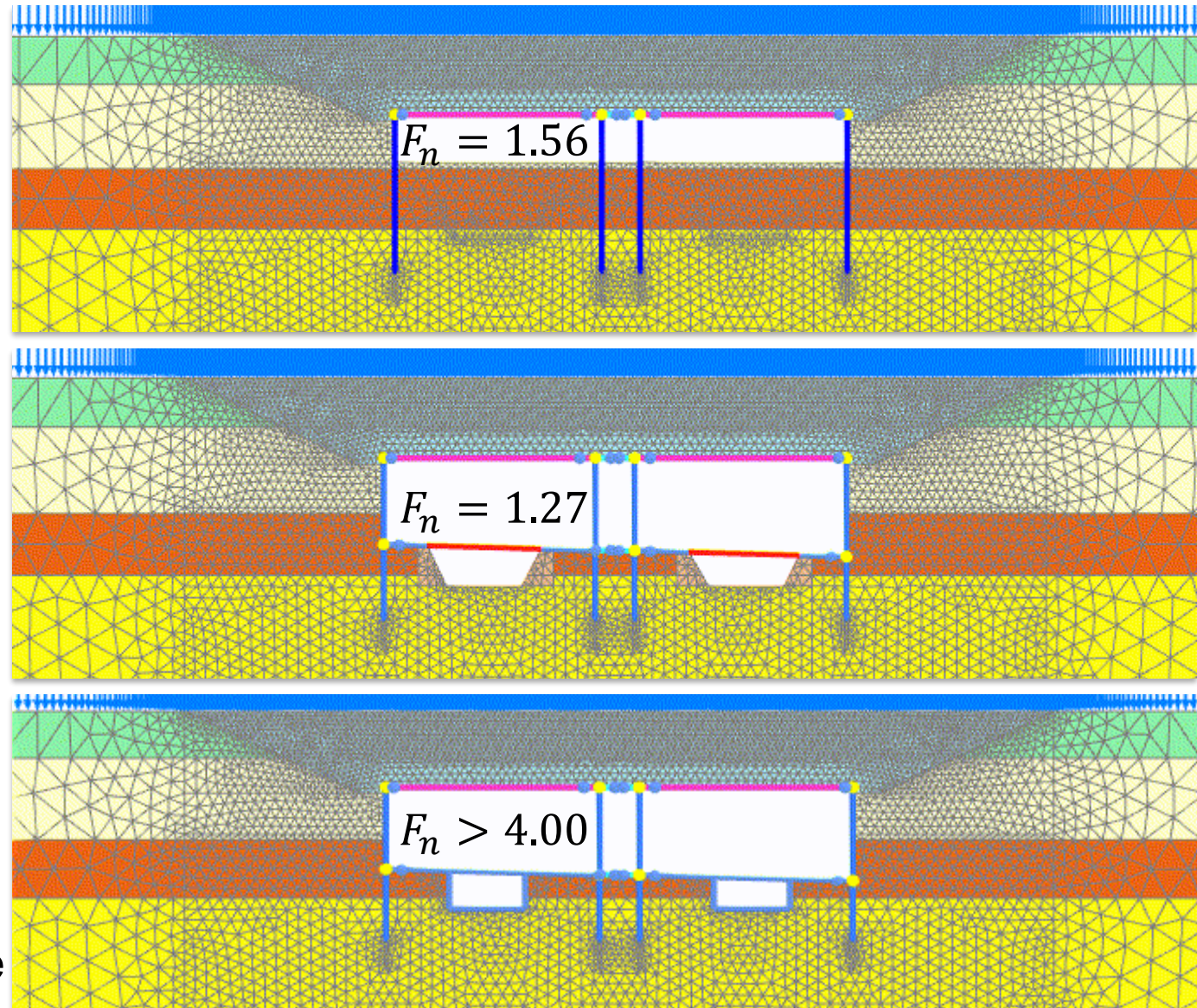
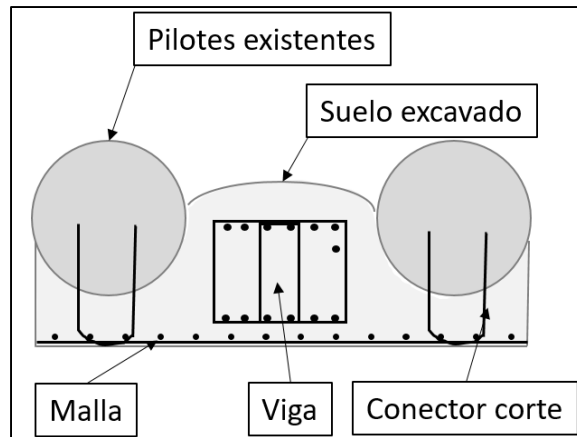
Los desplazamientos por fuera de la obra son insignificantes



Factor de seguridad

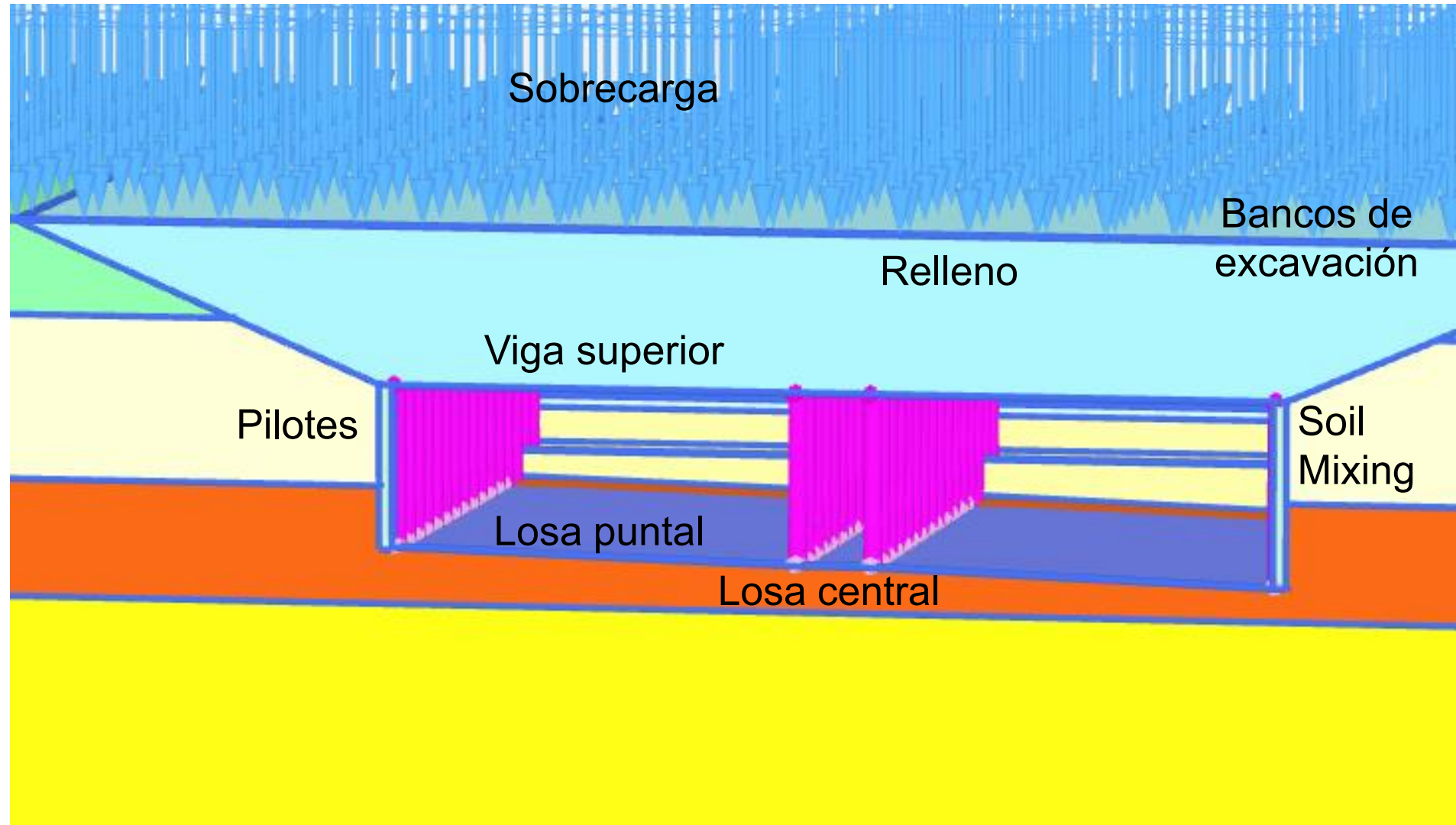


Factor de seguridad



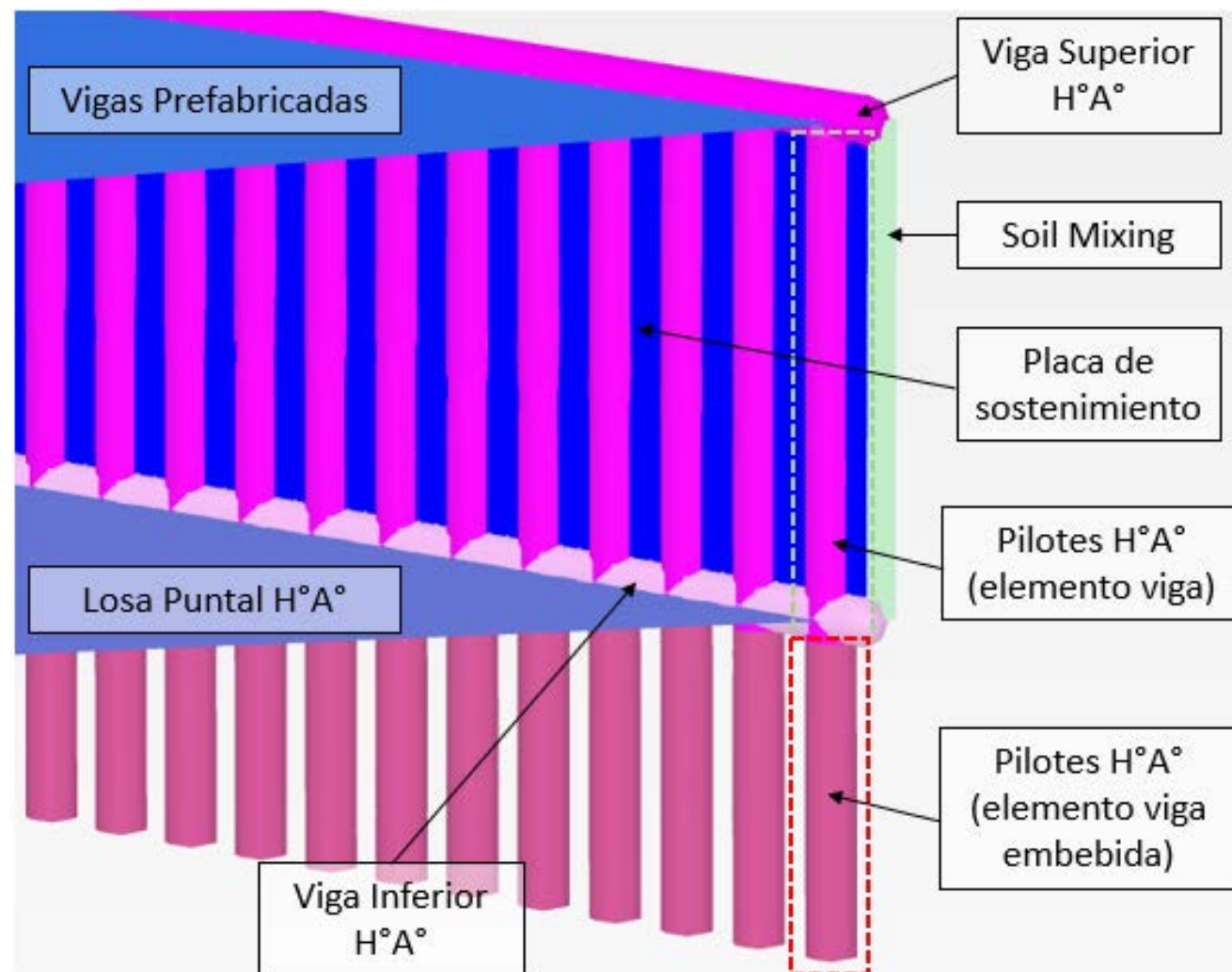
Este F_n es ficticio porque los elementos barra no pueden plastificar al corte

Modelo 3D: configuración

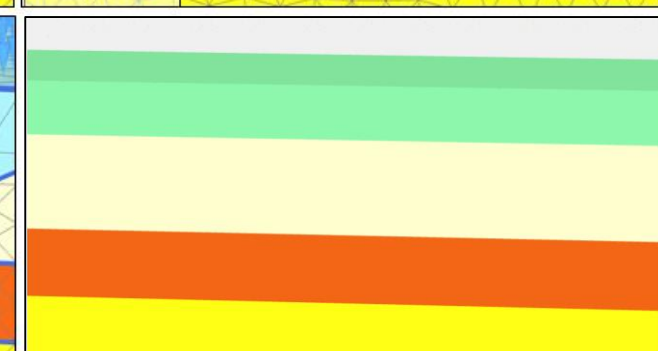
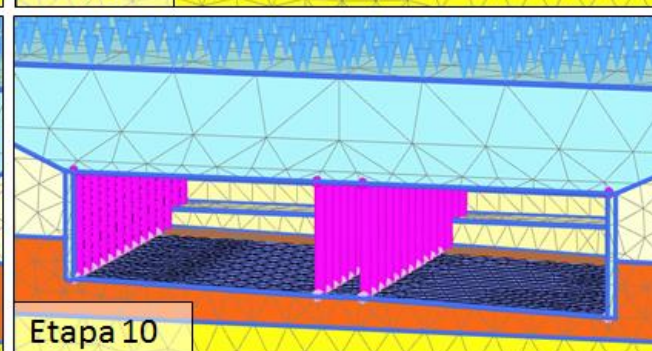
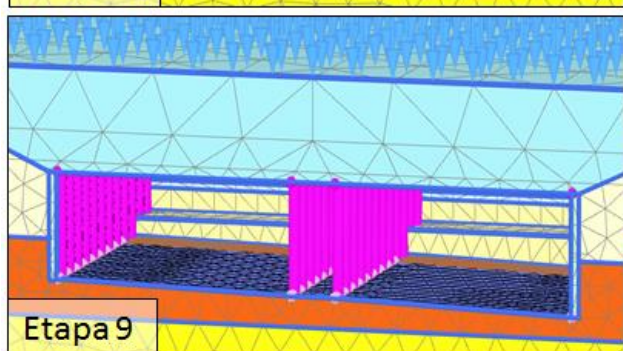
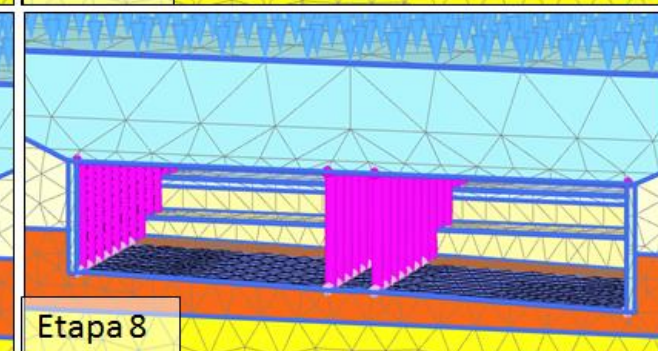
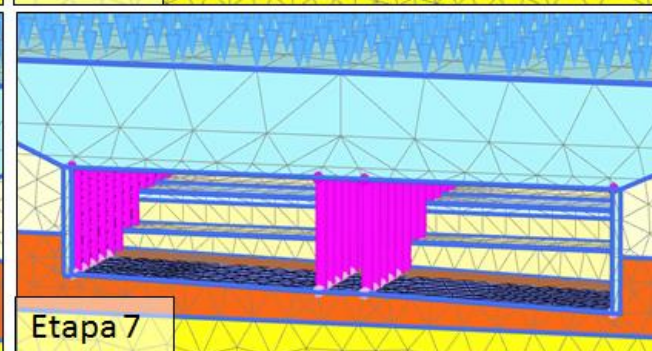
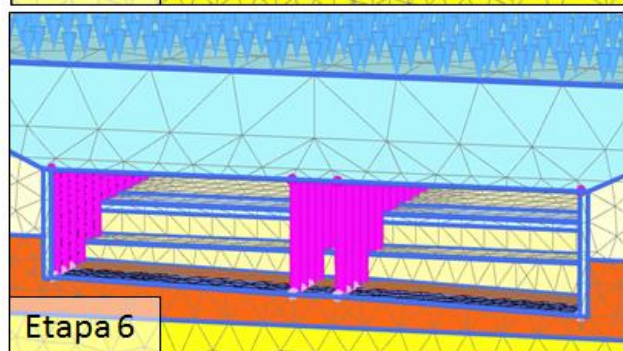
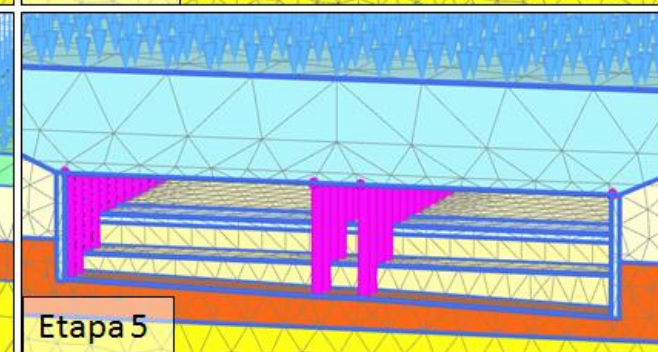
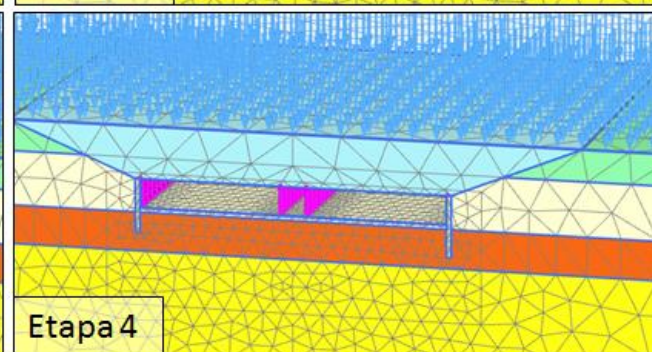
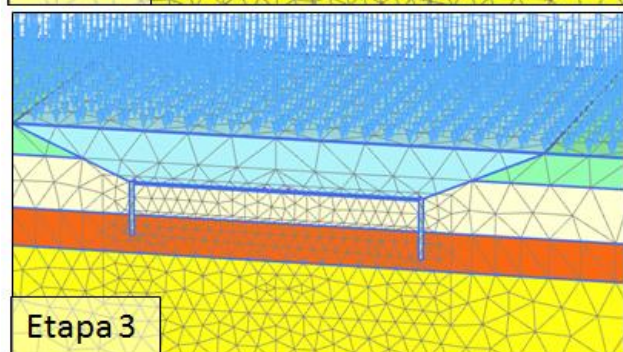
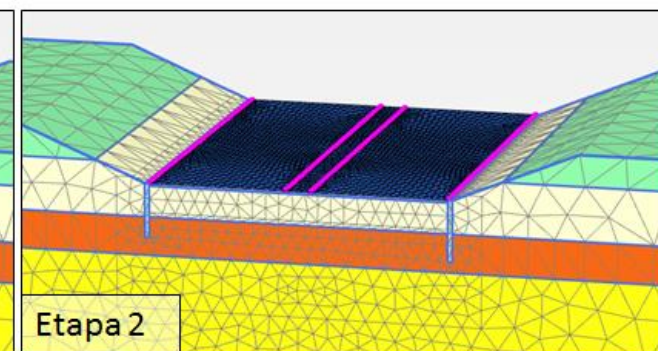
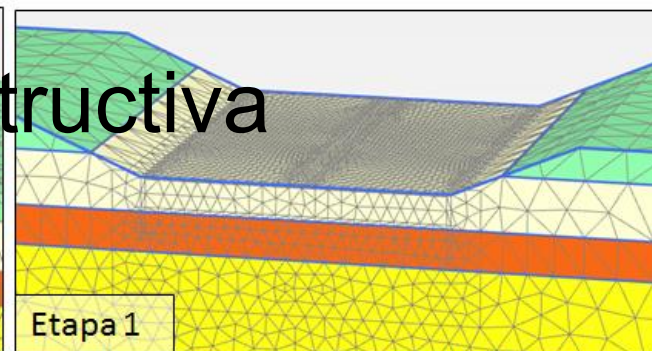
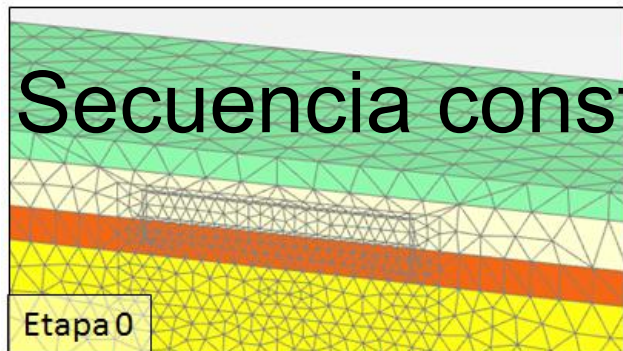


Modelo numérico 3D: detalle

- *Soil mixing* detrás de pilotes
- Placas de sostenimiento ficticias entre pilotes
- Pilotes: elementos viga (sobre losa)
- Pilotes: elementos viga embebida (bajo losa puntal)



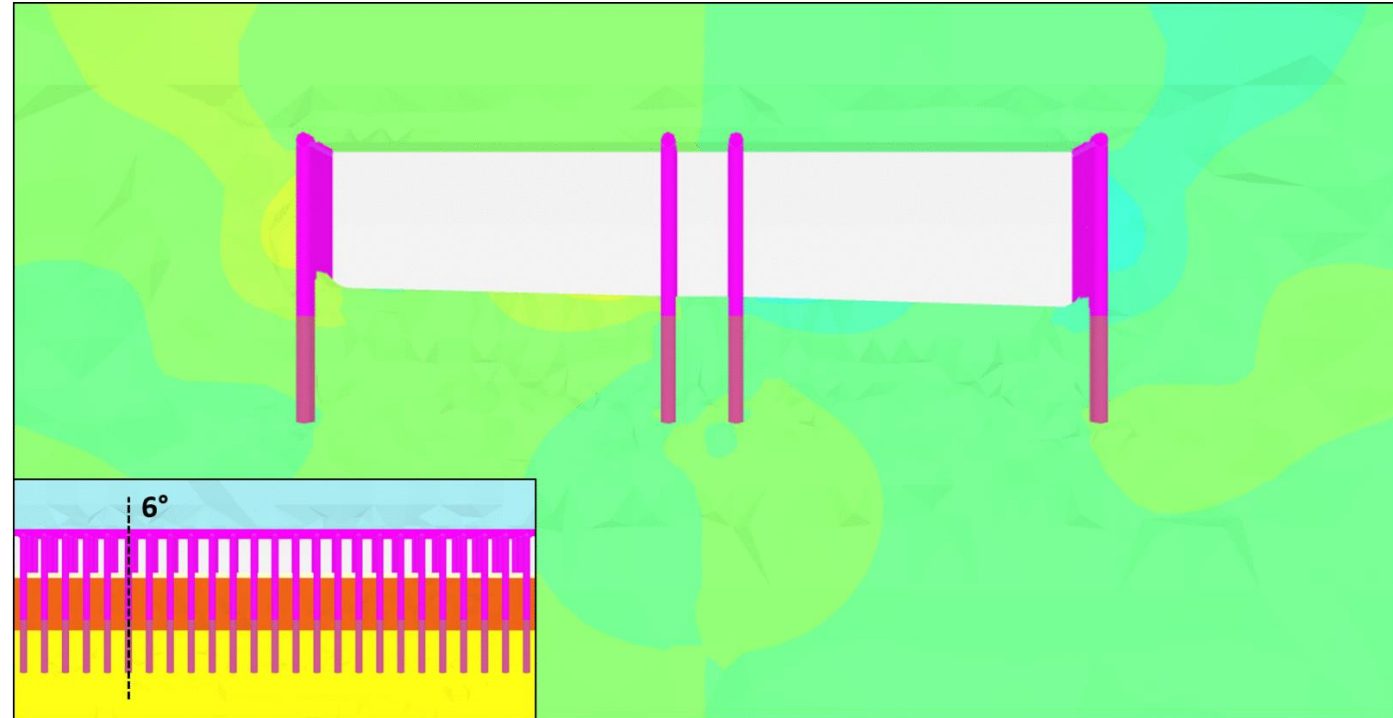
Secuencia constructiva



Desplazamientos

Desplazamientos horizontales se estabilizan luego de construida la viga inferior

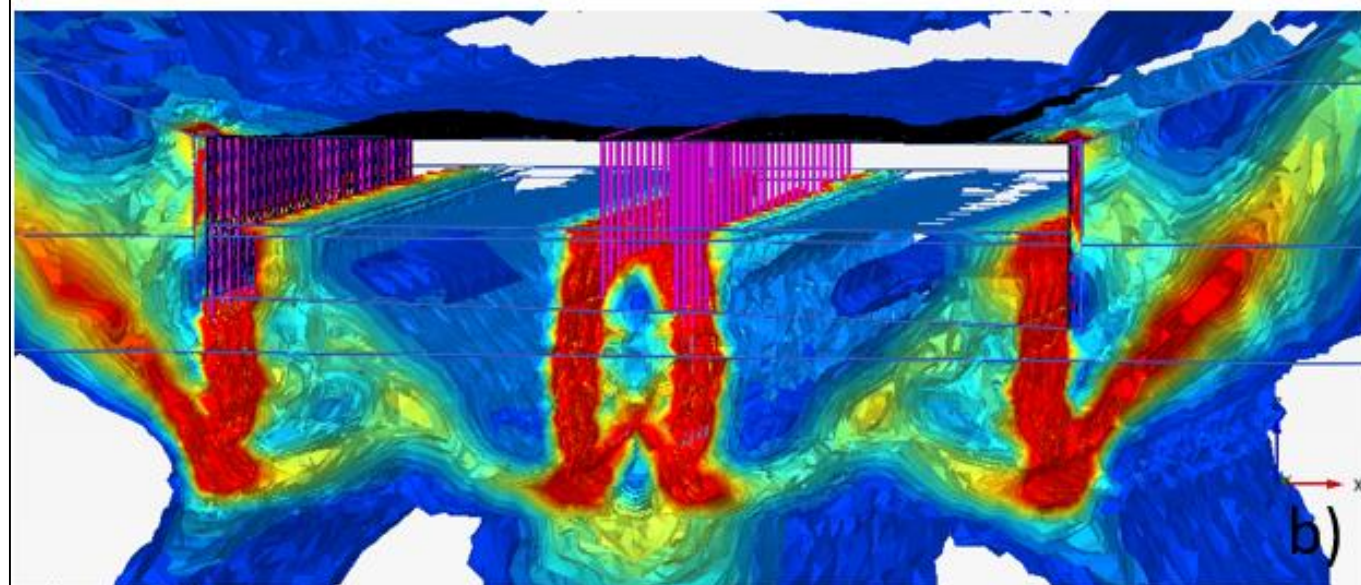
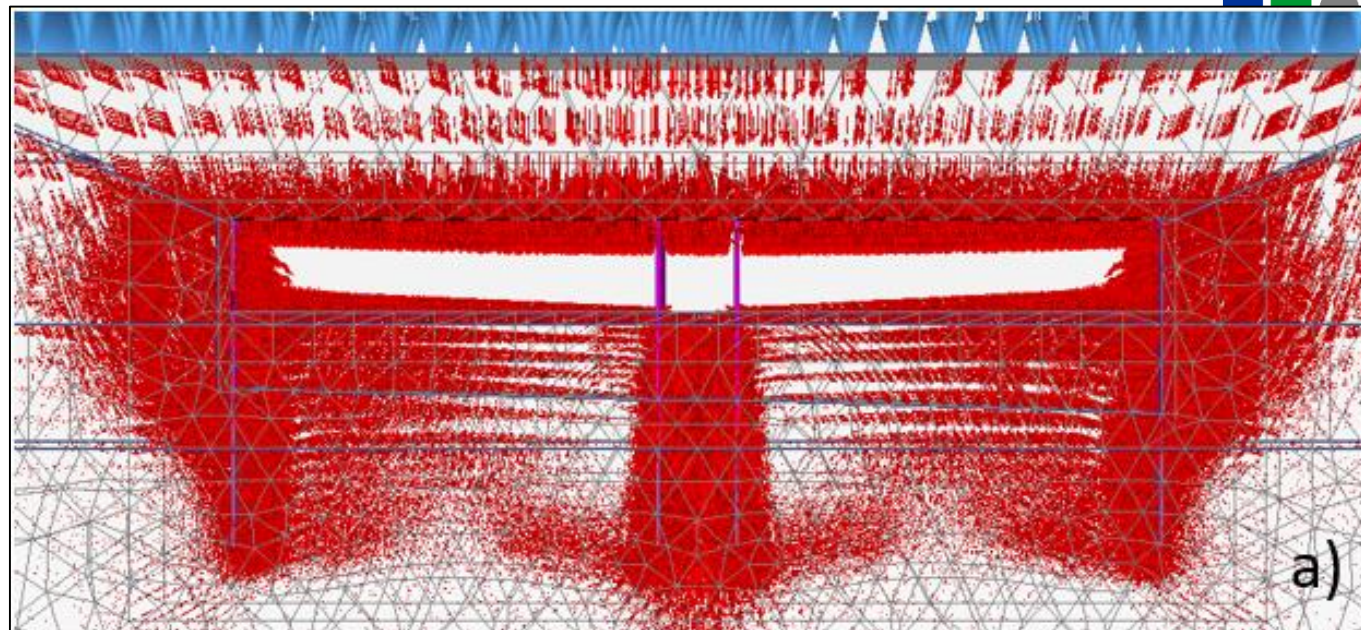
- $\delta_{h,2D} = 16mm$
- $\delta_{h,3D} = 14mm$



Mecanismos de falla

Se reproduce el mismo mecanismo de falla que en 2D

Con elementos estructurales elásticos: $F_n = 2.47$



Modelo 3D: resultados

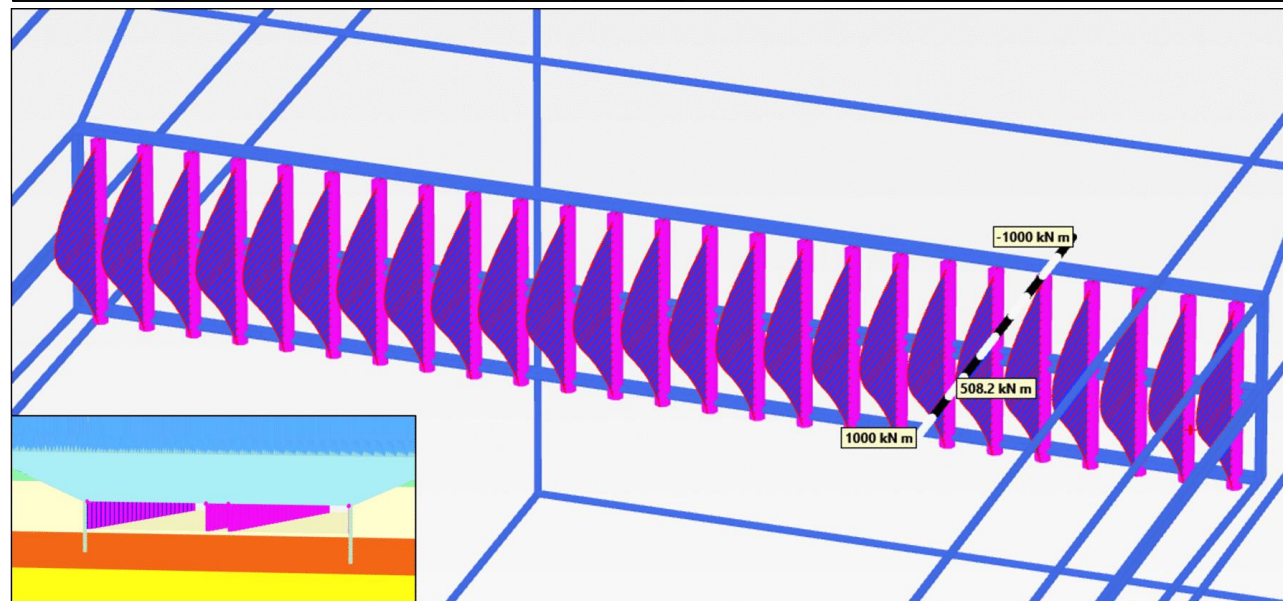
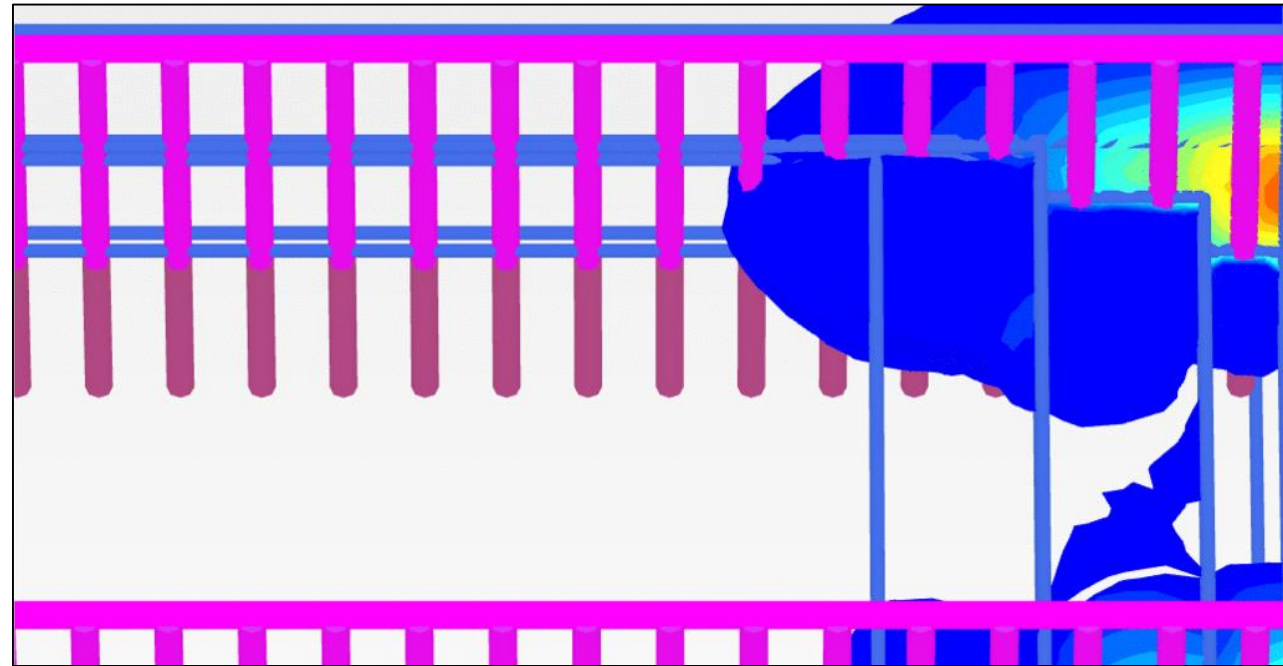
Momentos flexores

Excavación banco

- $M_{2D} = 656kN/m$
- $M_{3D} = 508kN/m$

Final

- $M_{2D} = 1114kN/m$
- $M_{3D} = 850kN/m$



Vista aérea antes del comienzo de la excavación del túnel



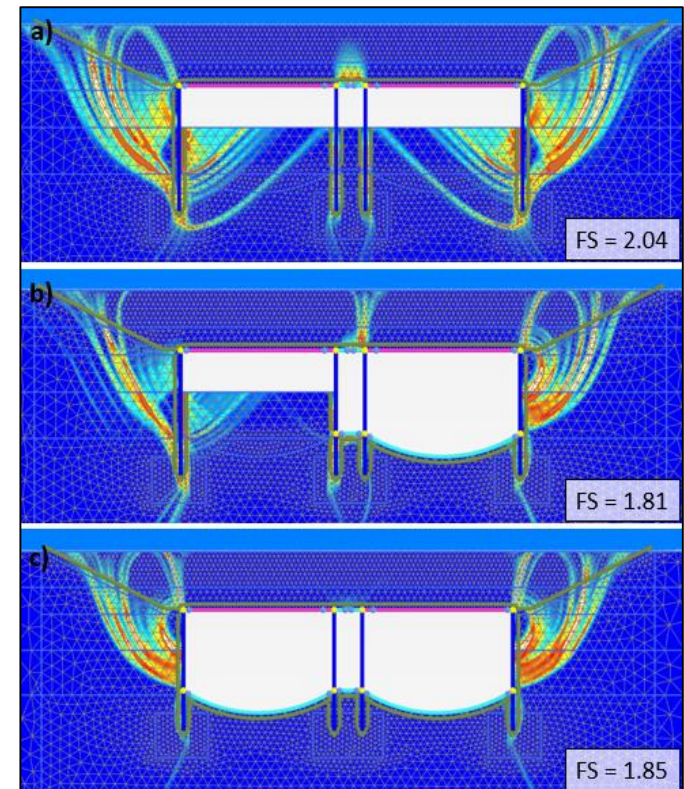
Vista aérea durante la excavación del túnel

srk



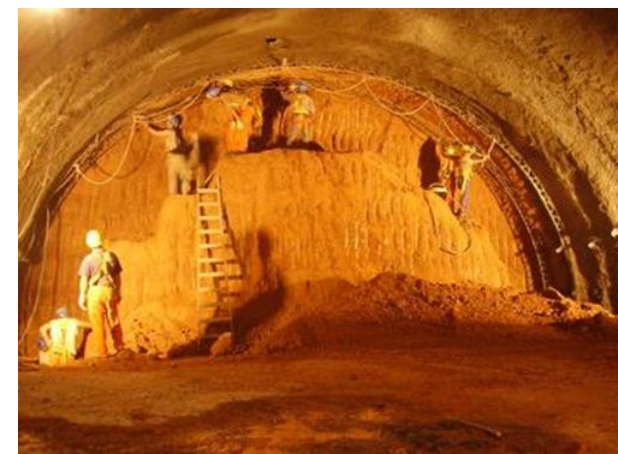
Contenido

- Procedimientos constructivos para túneles de frente abierto
- Simulación de procedimientos constructivos
- Diseño del revestimiento definitivo
- Ejemplo: El túnel Mujer Urbana
- Resumen



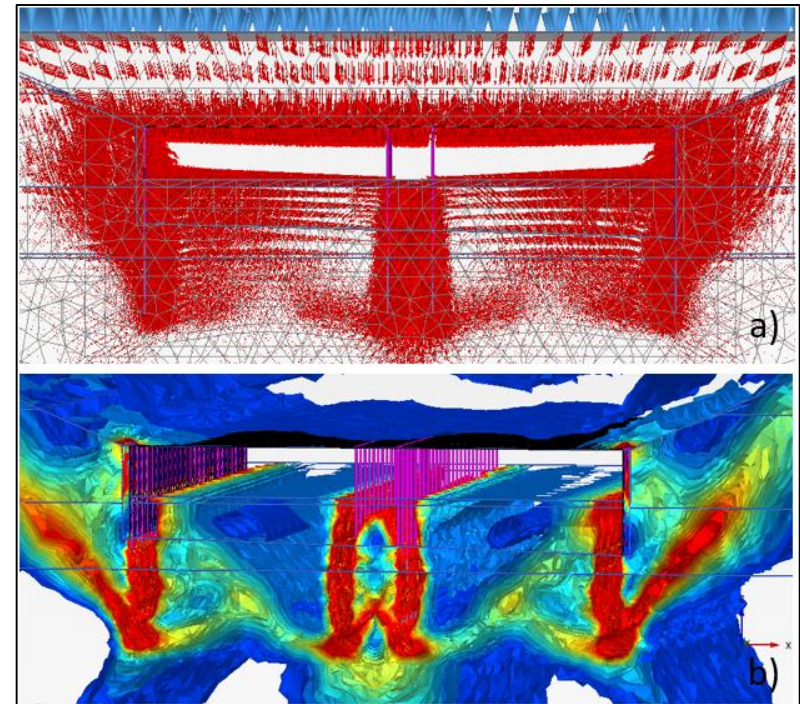
Resumen (1/2)

- Existen muchos métodos constructivos para túneles: cut&cover, alemán, belga, frente completo, side drift...
- La selección del procedimiento más adecuado depende de factores industriales y logísticos, pero también del terreno
- Los modelos numéricos permiten simular los diferentes procedimientos constructivos y optimizar el más conveniente



Resumen (2/2)

- Un modelo debe tener un objeto claro: **no intente responder a todas las preguntas a la vez**
- Para diseñar el revestimiento definitivo pueden usarse modelos de resortes o FEM
- Los modelos numéricos por etapas permiten resolver problemas relativamente complejos que involucran obras existentes y nuevas (ej: Mujer Urbana)





Respetemos a esta gente, que hizo la Línea A del Subte de Buenos Aires en dos años en 1912, doce años antes de la publicación de Erdbaumechanik