



## **3<sup>ras</sup> Jornadas de Túneles y Espacios Subterráneos**

# Proyecto y Rehabilitación de la Caverna de la Usina Hidroeléctrica de Paulo Afonso IV

Tarcísio B. Celestino<sup>1,2</sup>

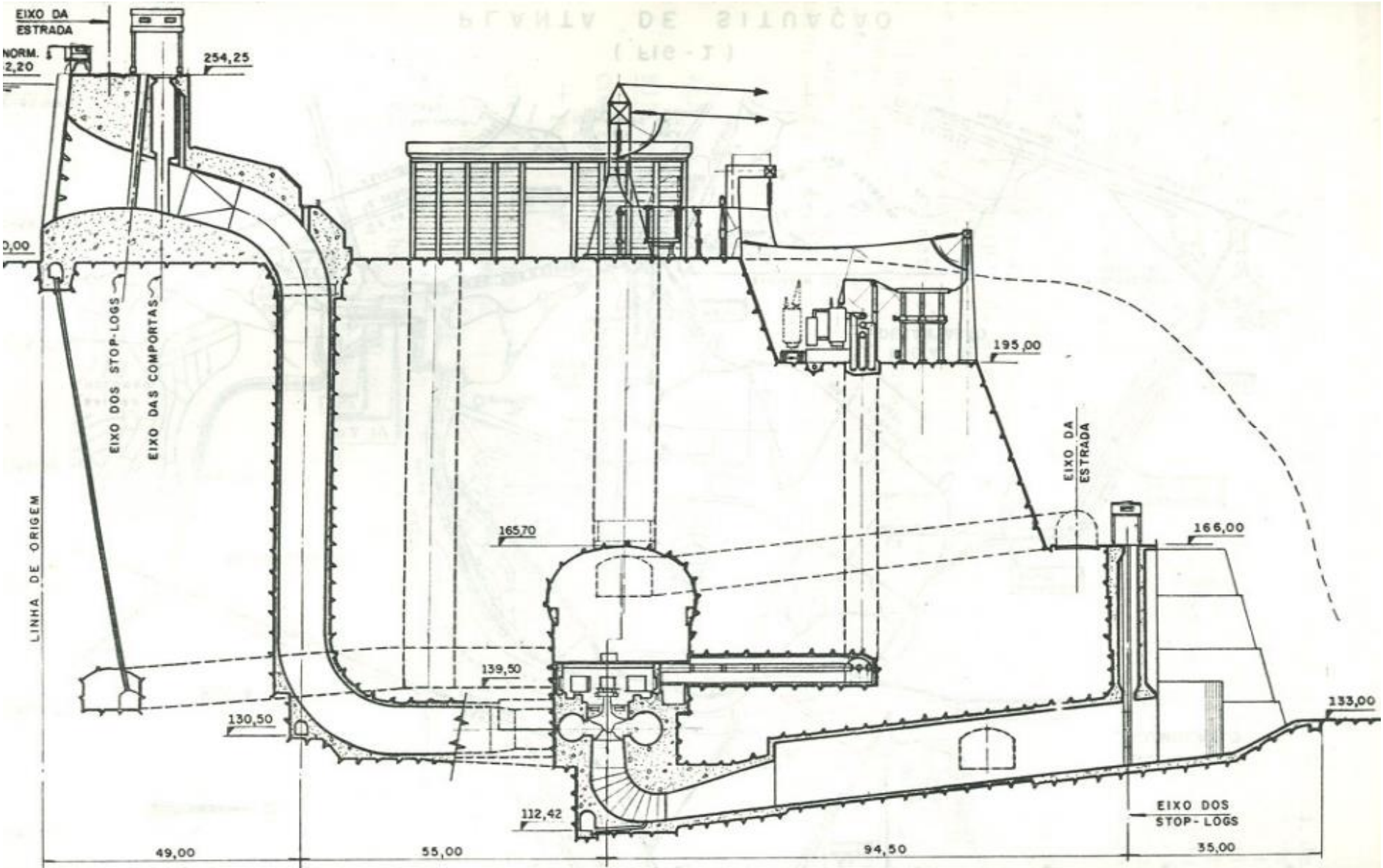
Giacomo Re<sup>1</sup>

1 – Themag Engenharia, São Paulo, Brasil

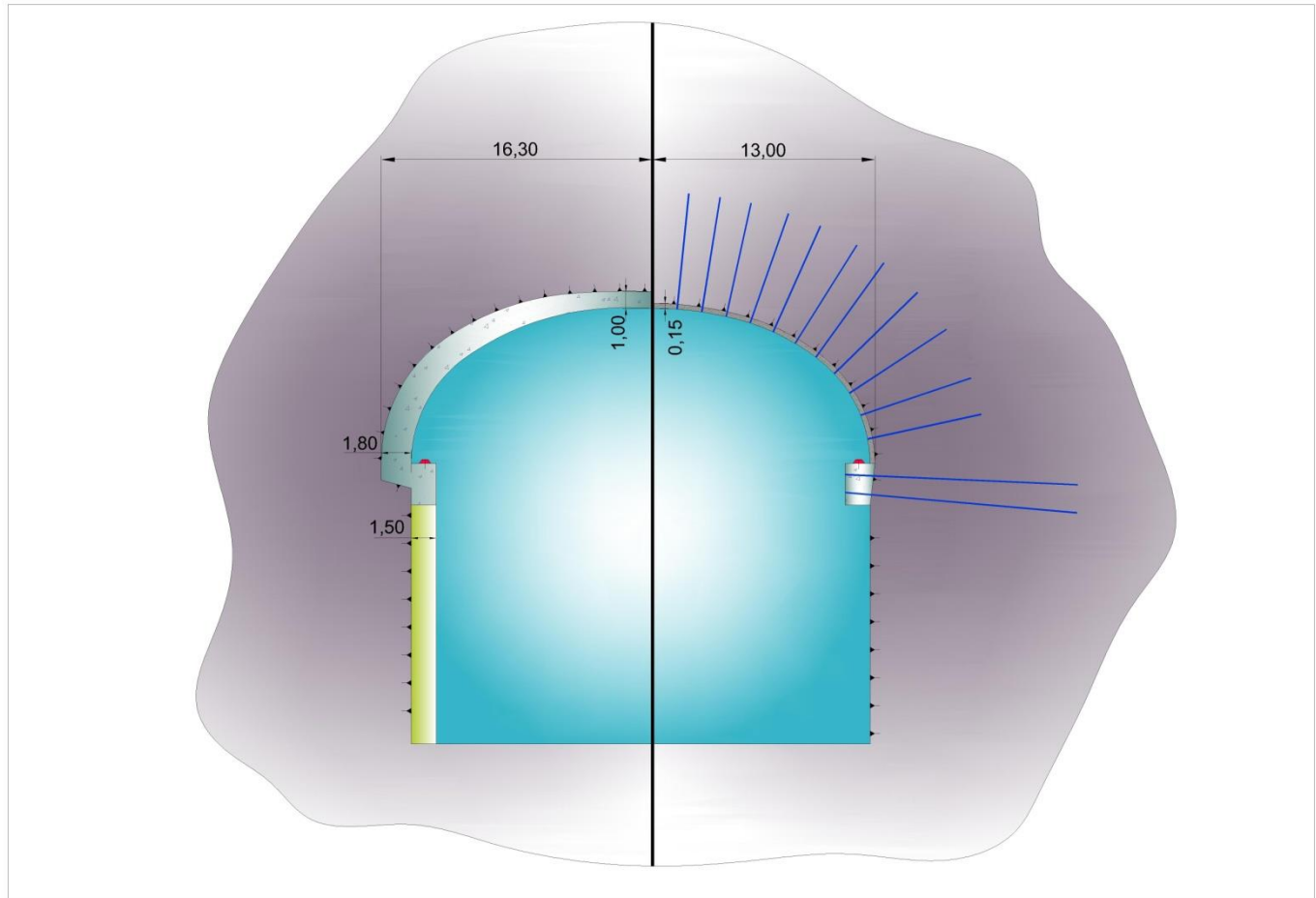
2 – Universidad de São Paulo

Buenos Aires, 4 de Julio de 2013

PLANO DE SITUAÇÃO  
(1:100)



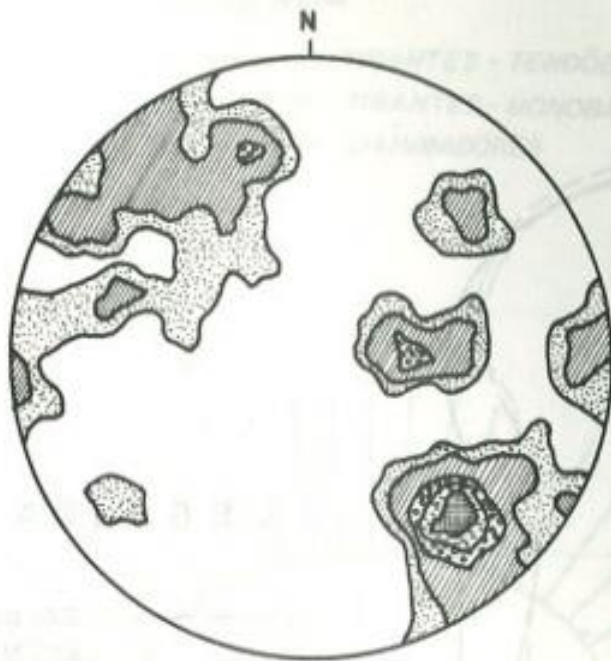
# Caverna de Paulo Afonso IV



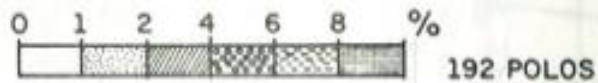
**Projeto Extranjero**

**Projeto Brasileiro**

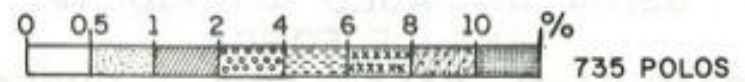
*DIAGRAMA DE FRECUENCIA*  
*(Hemisferio Inferior)*



**FALHAS E OU MICRO FALHAS • DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA  
HEMISFÉRIO INFERIOR**



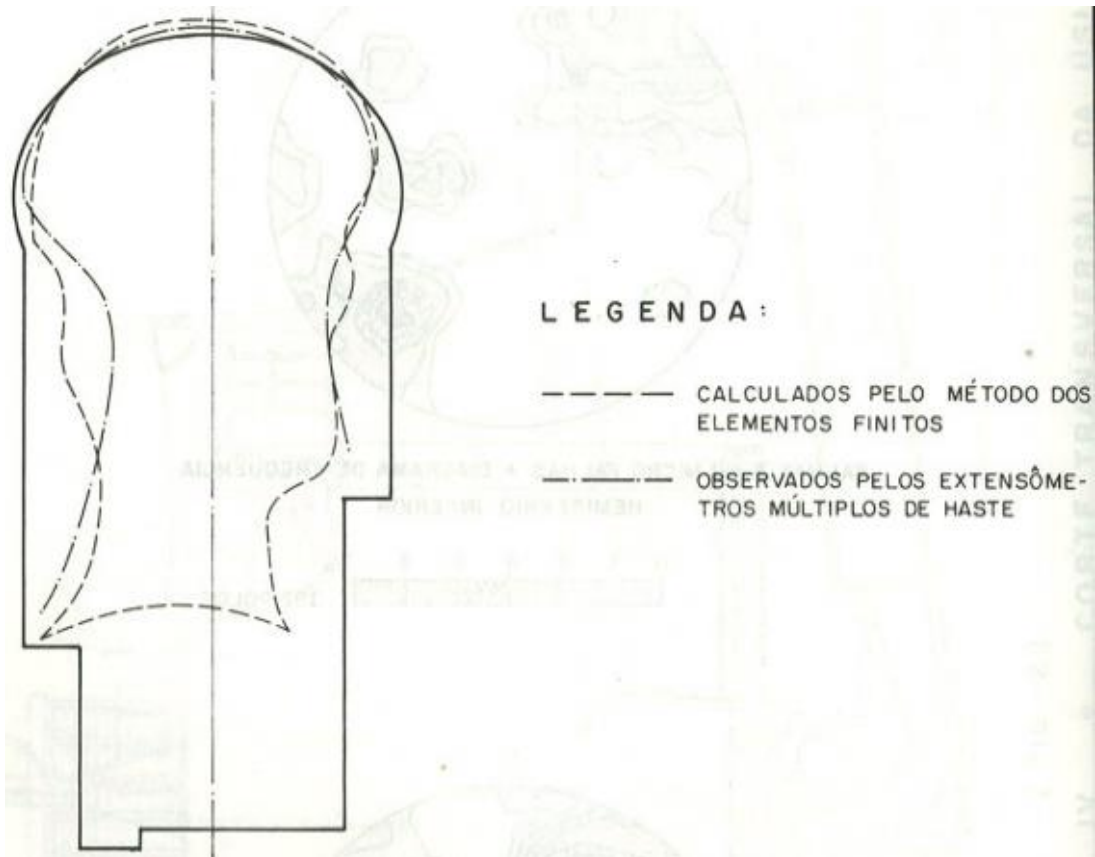
**FRATURAS E DIÁCLASES • DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA  
HEMISFÉRIO INFERIOR**





# CASA DE FUERZA

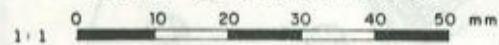
## Desplazamientos calculados y observados



### LEGENDA :

- CALCULADOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
- OBSERVADOS PELOS EXTENSÔMETROS MÚLTIPLOS DE HASTE

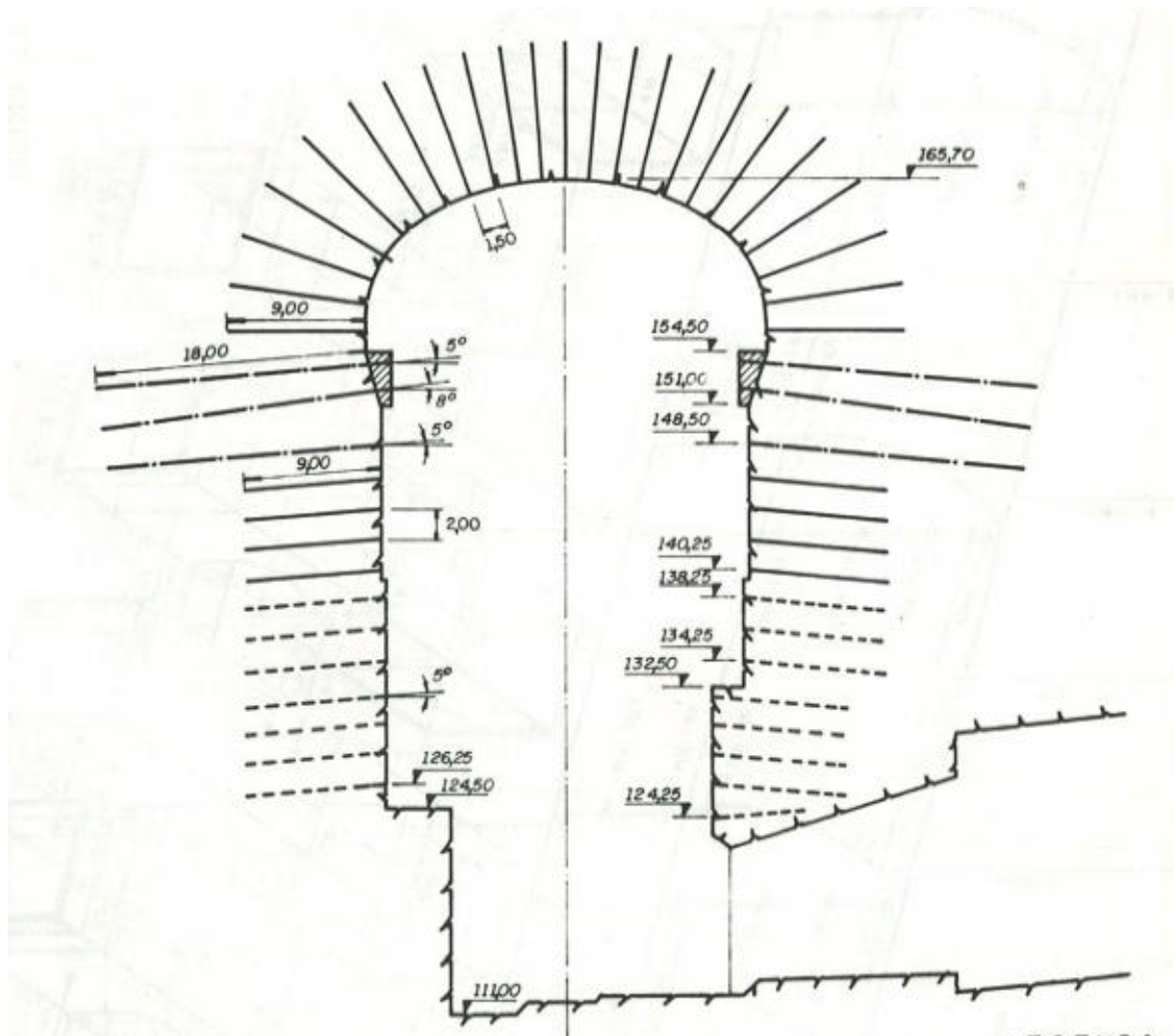
ESCALA DE DESLOCAMENTOS



$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$	$E = (t/m^2)$	$C = (t/m^2)$	$\phi$ (°)
1,75	$1,0 \times 10^6$	20	40

# CASA DE FORÇA

## Anclajes

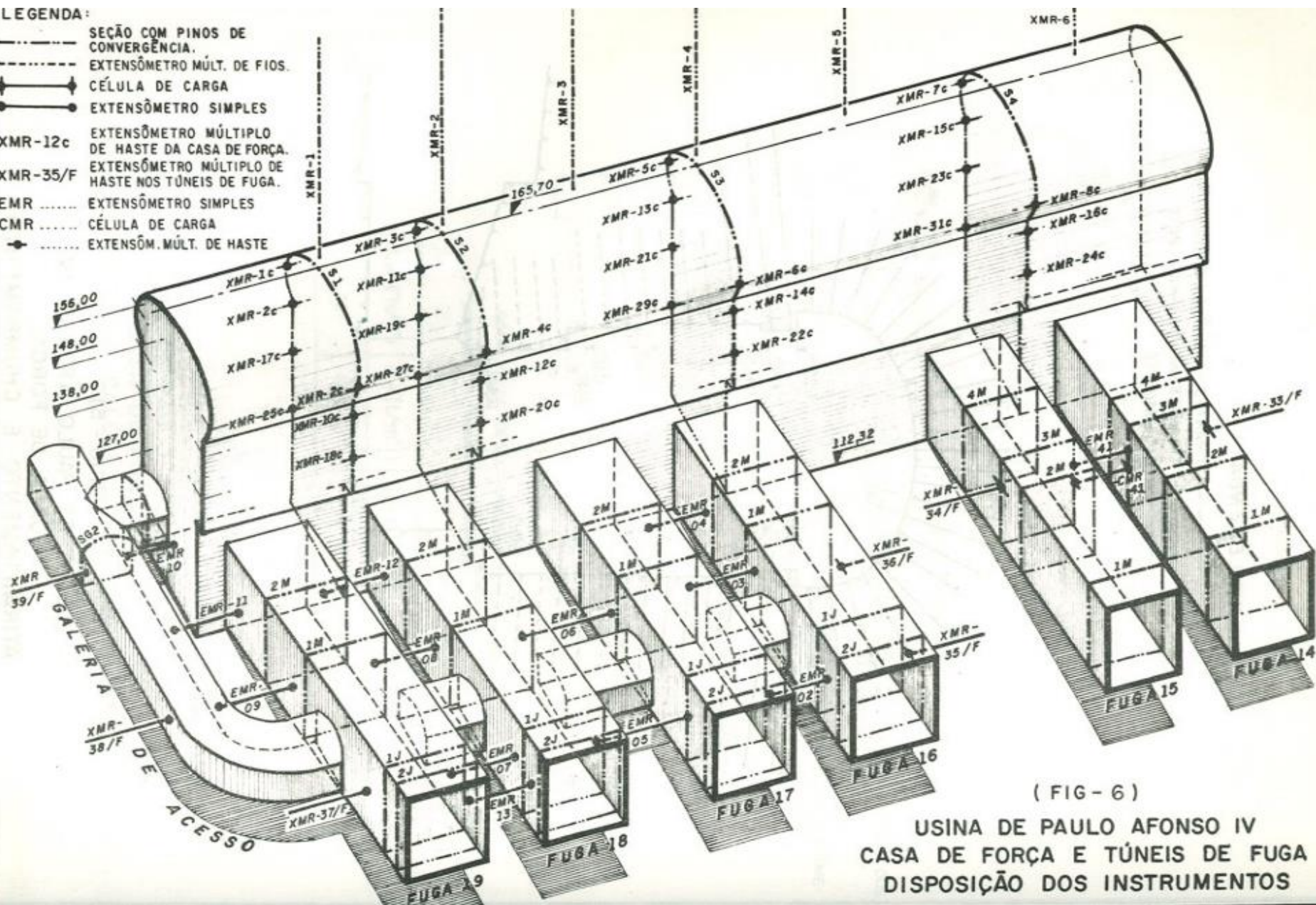


### LEGENDA

- · — · — TIRANTES - TENDÕES - 120 lf.
- — — — — TIRANTES - MONOBARRAS - 22 lf.
- - - - - CHUMBADORES

LEGENDA:

- SEÇÃO COM PINOS DE CONVERGÊNCIA.
- - - - - EXTENSÔMETRO MÚLT. DE FIOS.
- ◀▶ CÉLULA DE CARGA
- EXTENSÔMETRO SIMPLES
- XMR-12c EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO DE HASTE DA CASA DE FORÇA.
- XMR-35/F EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO DE HASTE NOS TÚNEIS DE FUGA.
- EMR ..... EXTENSÔMETRO SIMPLES
- CMR ..... CÉLULA DE CARGA
- ..... EXTENSÔM. MÚLT. DE HASTE



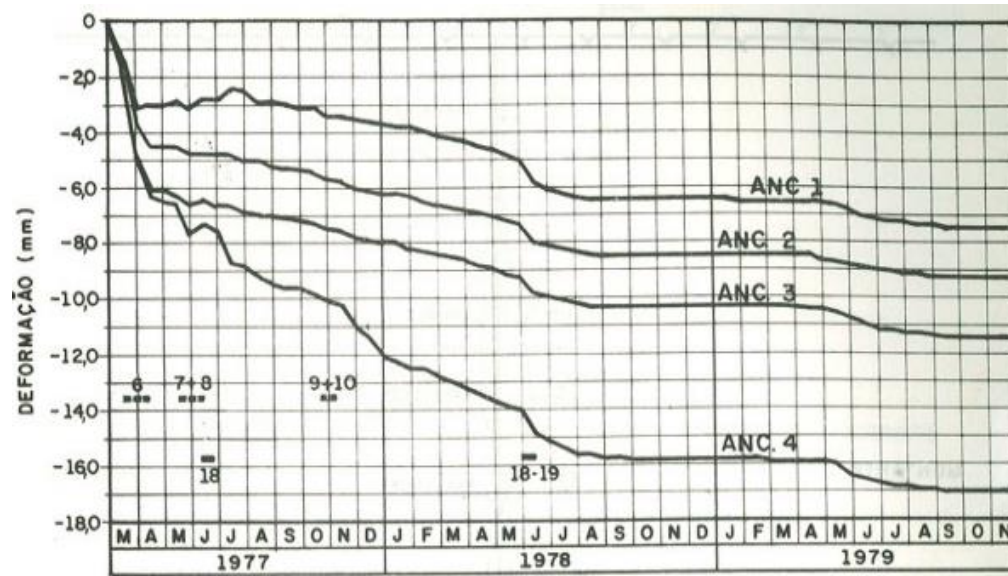
( FIG - 6 )

USINA DE PAULO AFONSO IV  
 CASA DE FORÇA E TÚNEIS DE FUGA  
 DISPOSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS



# CASA DE FUERZA

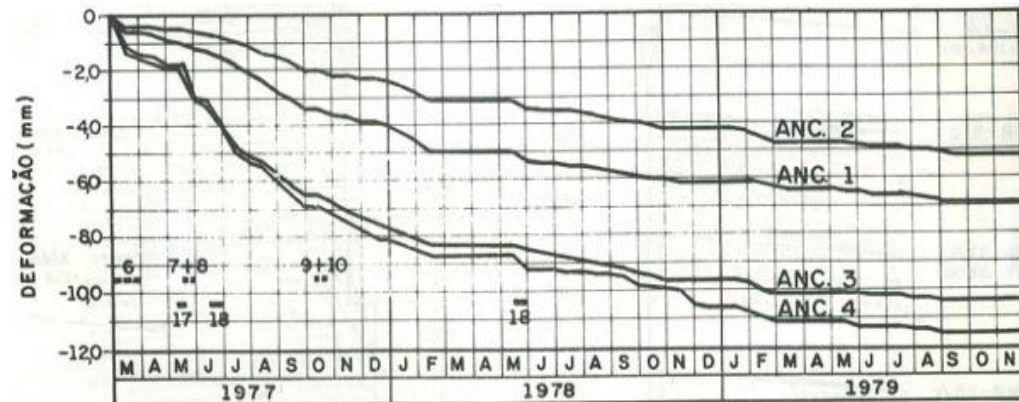
## Deformación x Tiempo – Extensómetro múltiplo de hastes



EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO DE HASTES (XMR-10/c)  
PROGRESSIVA 35 - ELEV. 148,00 - JUSANTE

7+8  
18

7+8 - FASES DE ESCAVAÇÃO DA CAVERNA  
18 - ESCAVAÇÃO DOS TÚNEIS DE FUGA



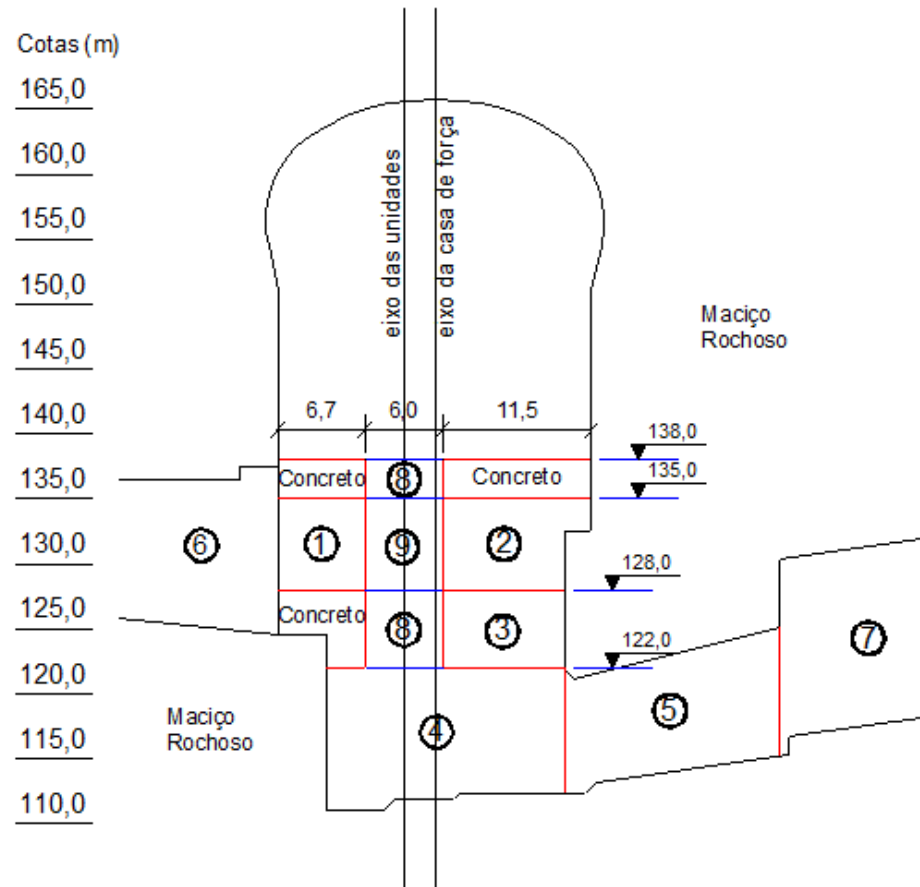
EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO DE HASTES (XMR-12/c)  
PROGRESSIVA 60 - ELEV. 148,00 - JUSANTE



# Rehabilitación de la Caverna

## Paulo Afonso IV

# Sección transversal de la caverna



# Historia

- 1979 – fin de la construcción
- 1993 – rehabilitación de algunos pernos corroidos
- 2003 – perno a el. 146,00 m falla
- Necesidad de reinstalación? Rehabilitación de todos los pernos?

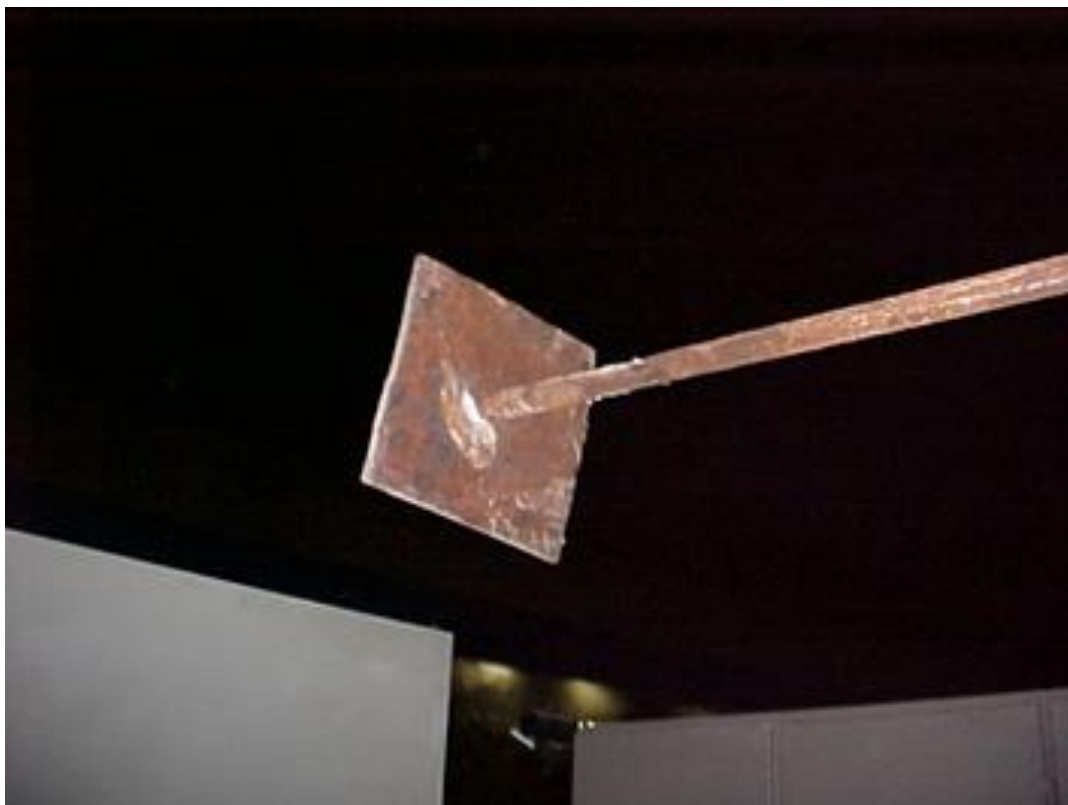


# Instrucciones de diseño

- Pernos sólo deberían ser inyectados después de la excavación de áreas adyacentes; necesidad de desplazamiento de estabilización antes de inyectar
- Inspecciones rigurosas

Nota la falta de indicios de lechada









# Perno retirado



- Sin lechada (protección insuficiente)
- Corrosión
- Deformación debido a carga

# Perno fallado



- Sin lechada
- Corrosión (podría haber sido disminuido pero eliminado con lechada)
- Indicaciones de alto estiramiento



# Perno en buenas condiciones sin lechada



# Perno inyectado con indicaciones de filtración



# Protección de corrosión eficaz apenas para la superficie externa



# Infiltración y corrosión





# Deformación debido a la corrosión





# Corrosión severa



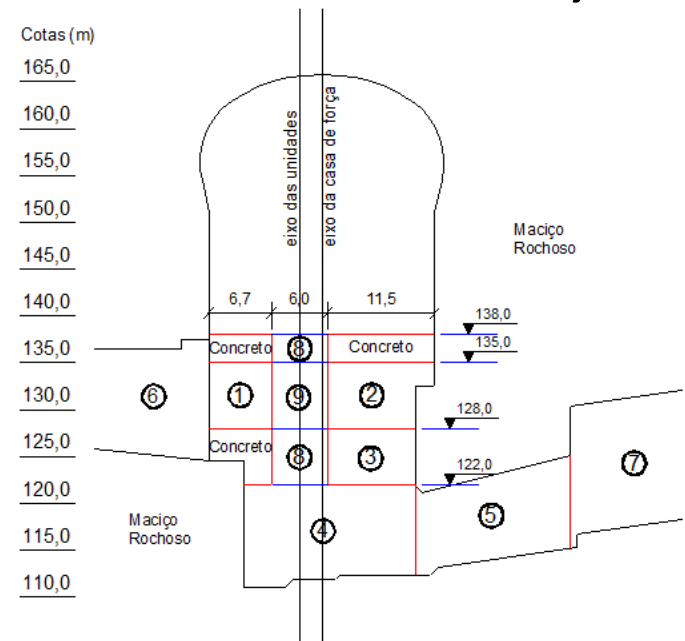
# Cabeza del tendón – infiltración



# Infiltración severa



# Simulación de construcción, operación y retirada de pernos por análisis FEM,



- A1 – Estado inicial del macizo de roca;
- A2 – Ejecución de excavación de la plataforma de la subestación;
- A3 –Escavación de la bóveda de la caverna hasta la elevación de 151,0 m;
- A4 – Instalación de tirantes de la bóveda y de la viga del puente rodante;
- A5 – Escavación de rebaje de la caverna hasta la elevación de 139,5 m;
- A6 – Instalación de los tirantes de las paredes de la caverna de la Casa de Fuerza;
- A7 – Escavación de rebaje de la caverna hasta la elevación de 124,5 m;
- A8 – Escavación de rebaje de la caverna hasta la elevación de 111 m.

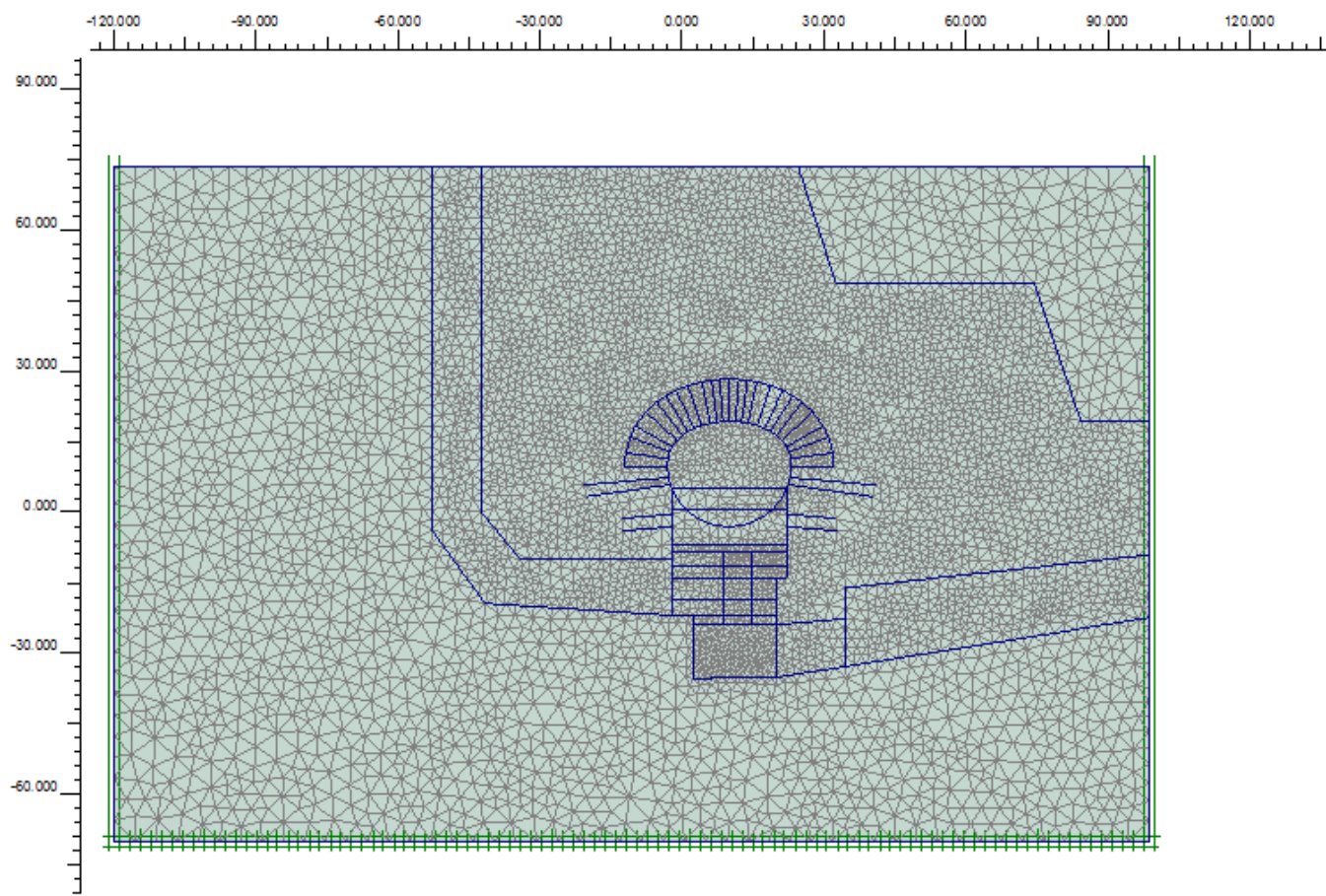
# Hormigonado

- B1: materiales 4, 5 y 7, estructuras entre cotas 111,0m y 122,0m,
- B2: materiales 3 y 8, estructuras entre cotas 122,0m y 128,0m
- B3: materiales 1, 2, 6 y 9, estructuras entre cotas 128,0m y 135,0m, y revestimiento de los Pozos y Túneles Aductores
- B4: material 8 estructuras entre cotas 135,0m y 138,0m

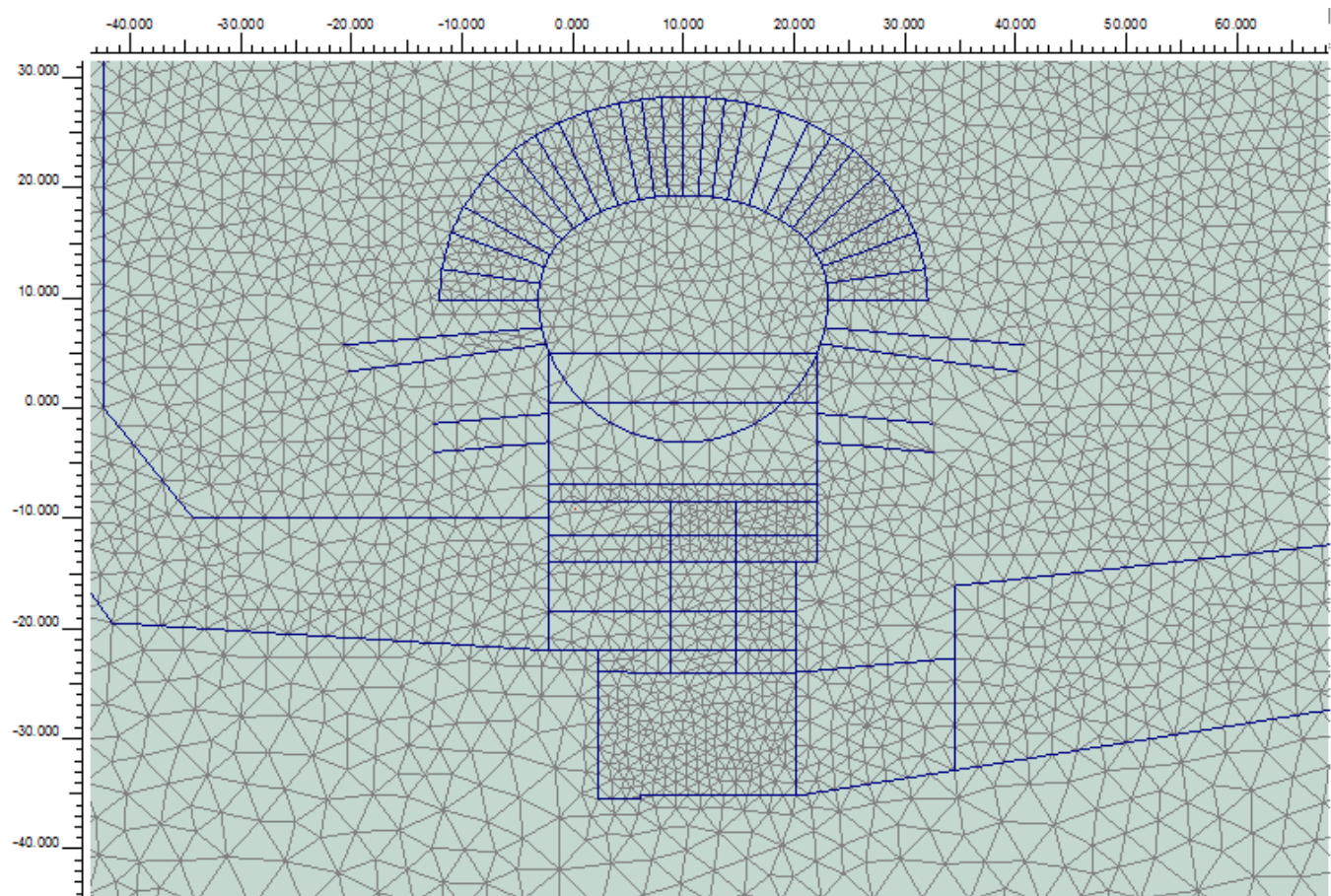


# Retirada de perno y operación

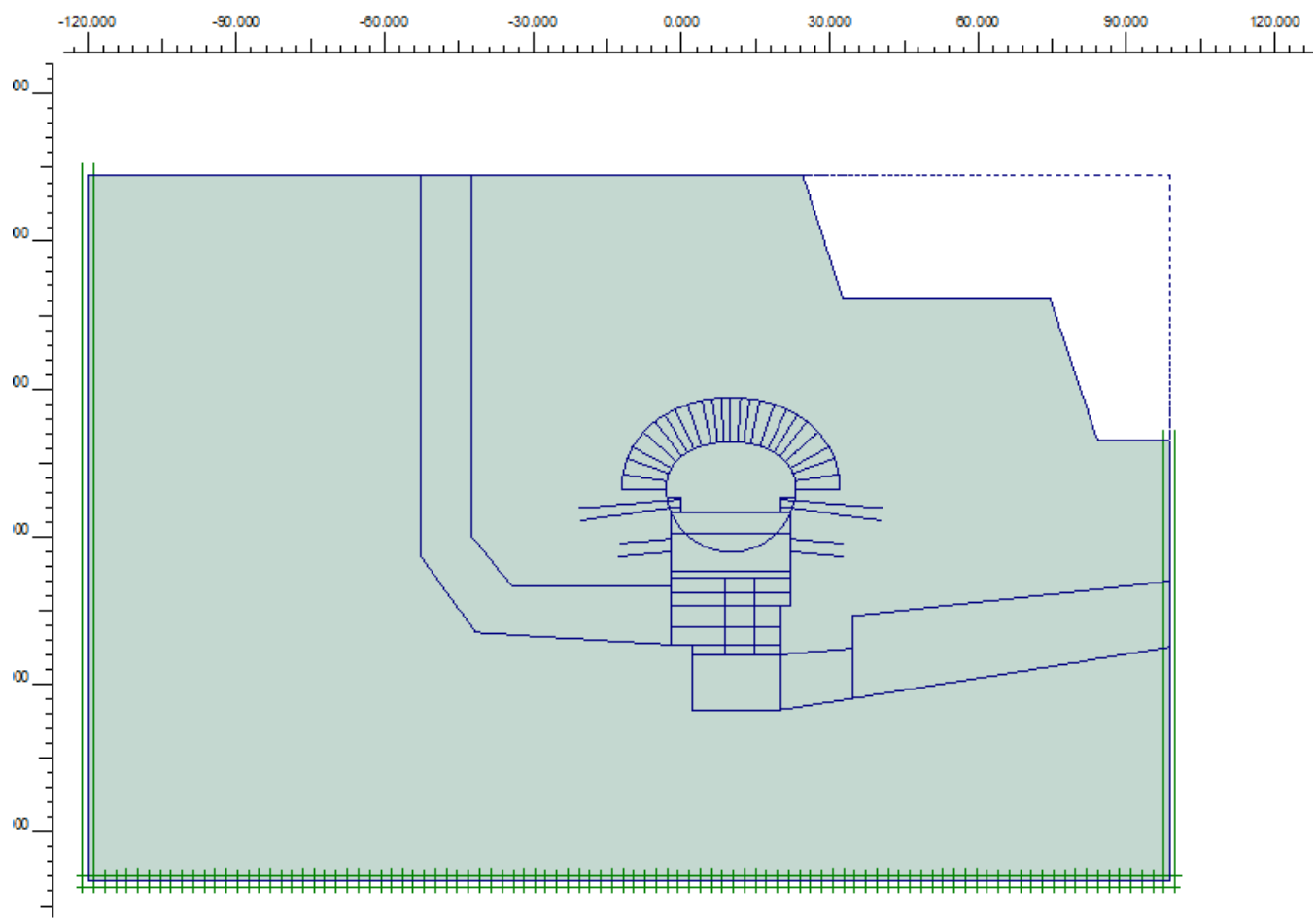
- – Desactivación de los tirantes de las paredes 3D: 3 líneas de tirantes de las paredes de río arriba y río abajo
- C2 – Desactivación de los tendones instalados en la cota 148,5m en las paredes río abajo y río arriba
- C3 – Operación del puente rodante (carga río arriba): carga máxima próximo a la pared río arriba
- C4 – Operación del puente rodante (carga río abajo): ídem al caso anterior, invirtiendo posición de las reacciones de apoyo

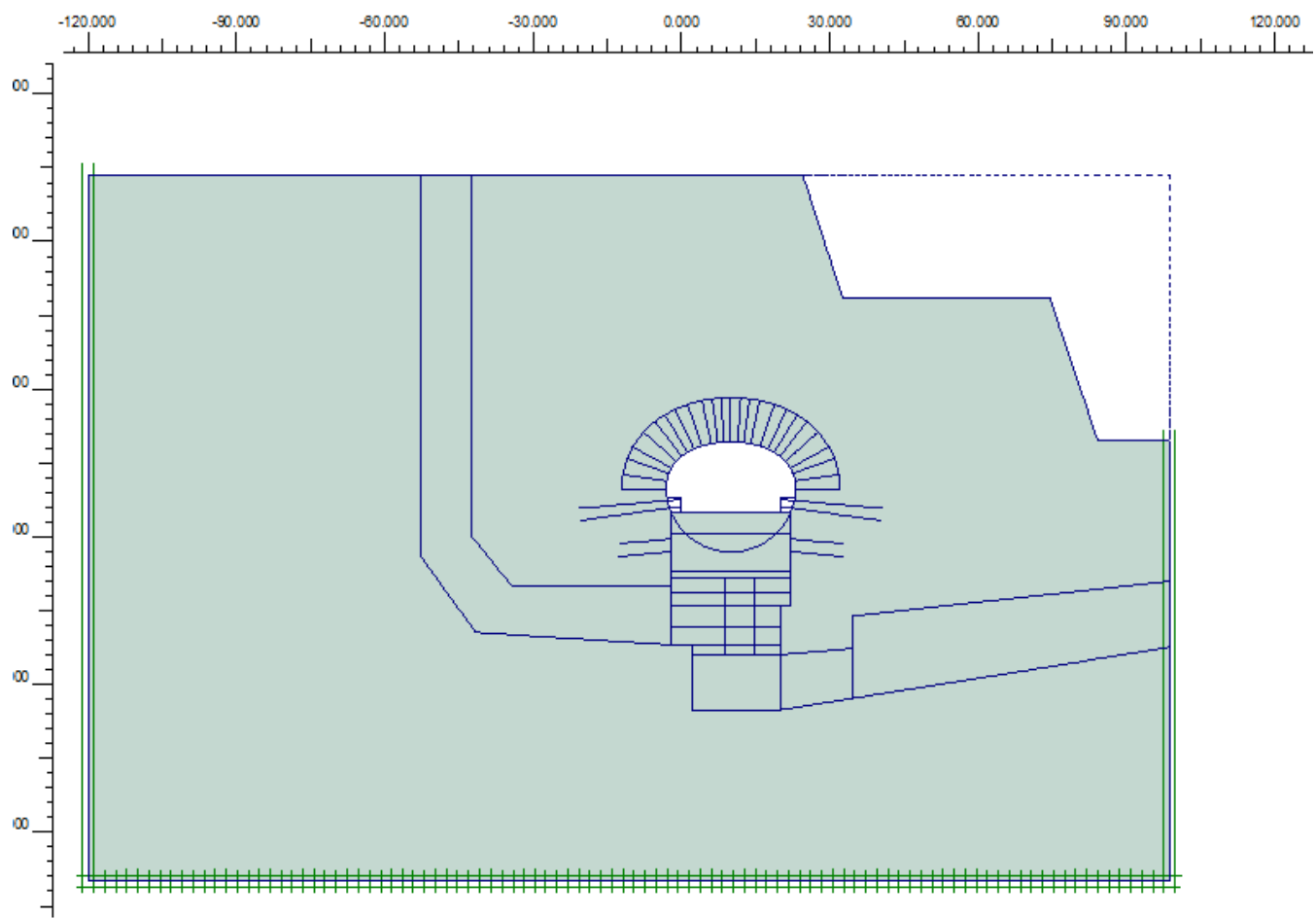


Effective stresses  
Extreme effective principal stress: 5.8E+07 kN/m<sup>2</sup>

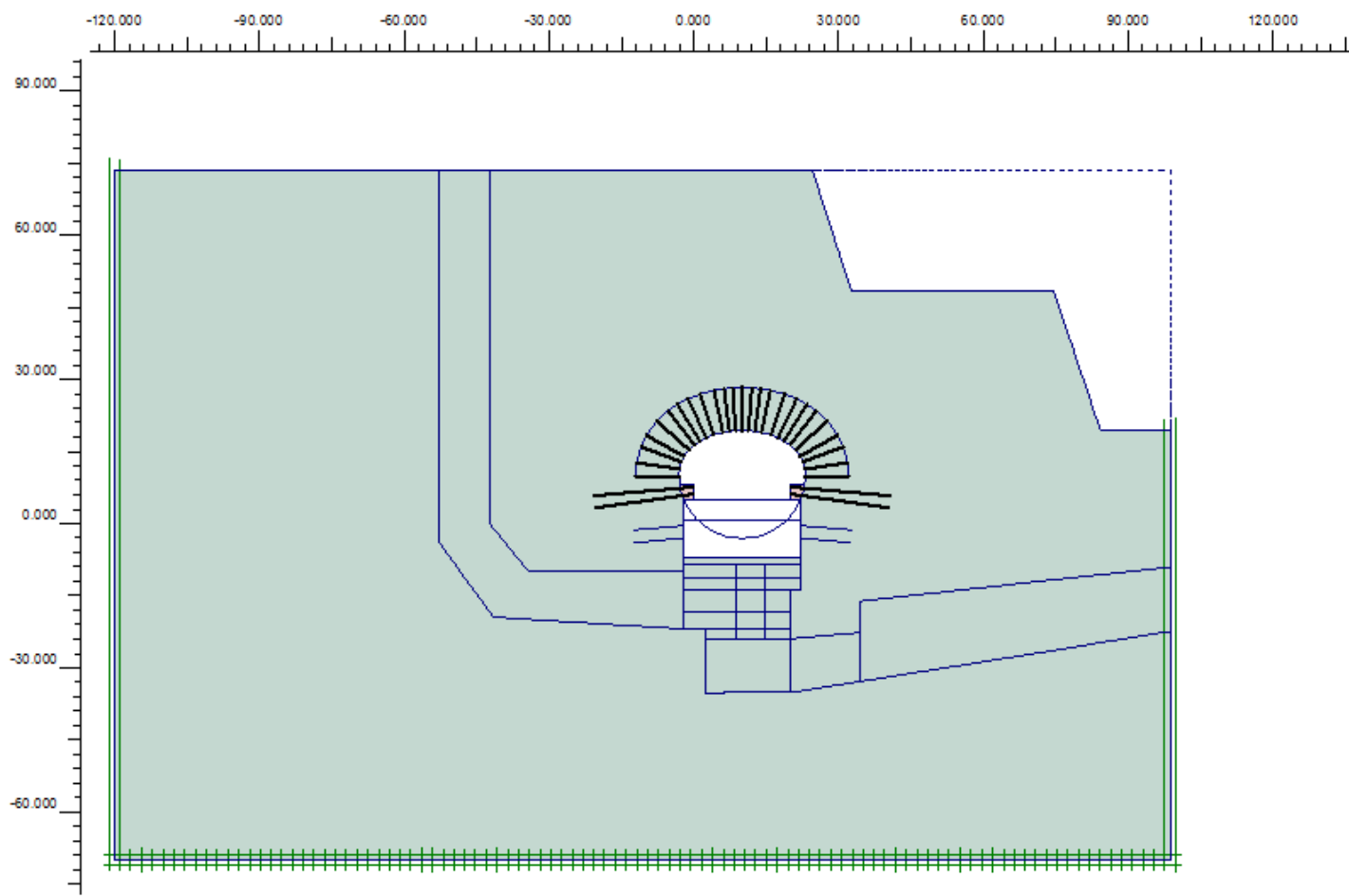


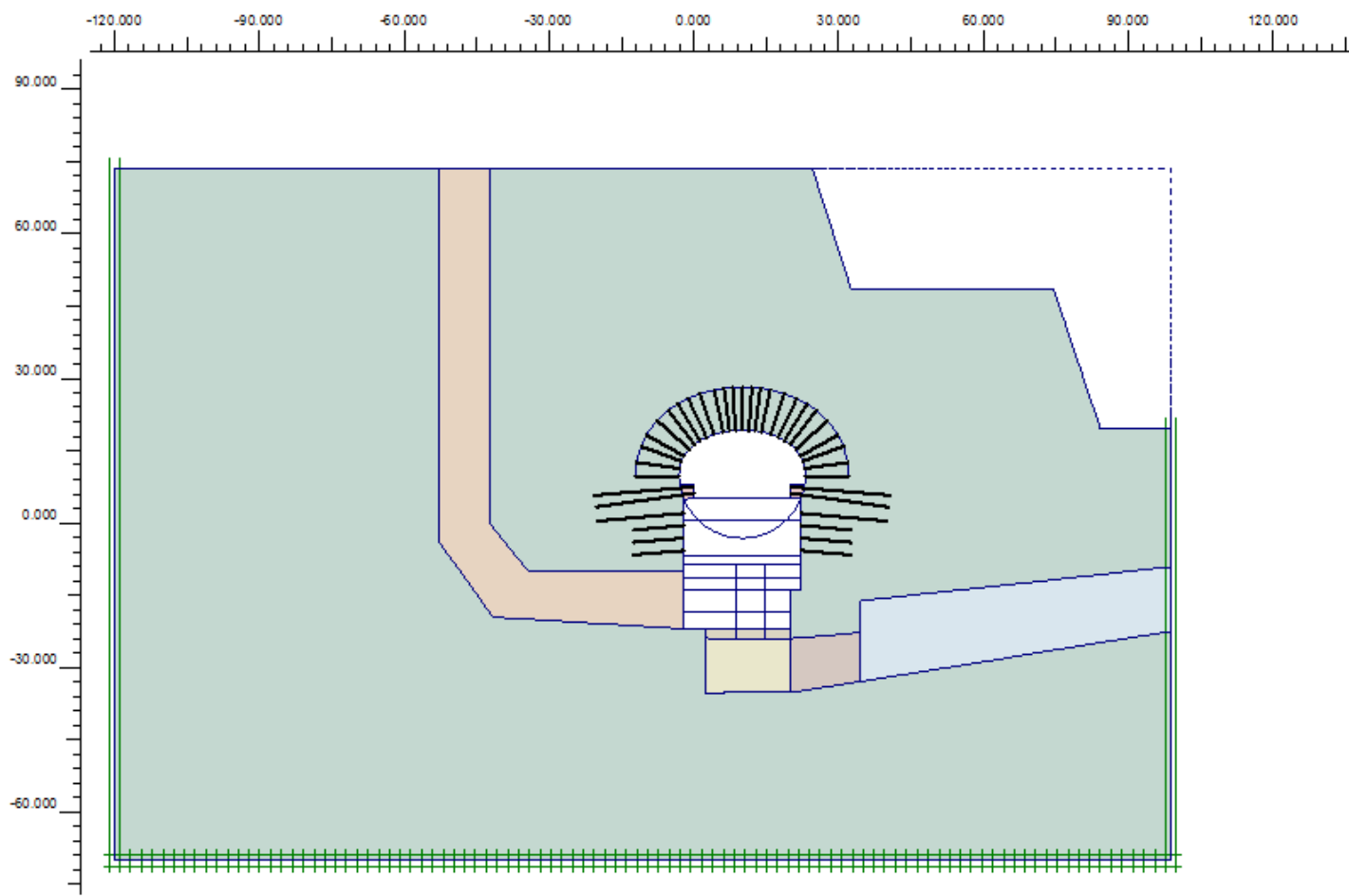
Effective stresses  
Extreme effective principal stress:  $5.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

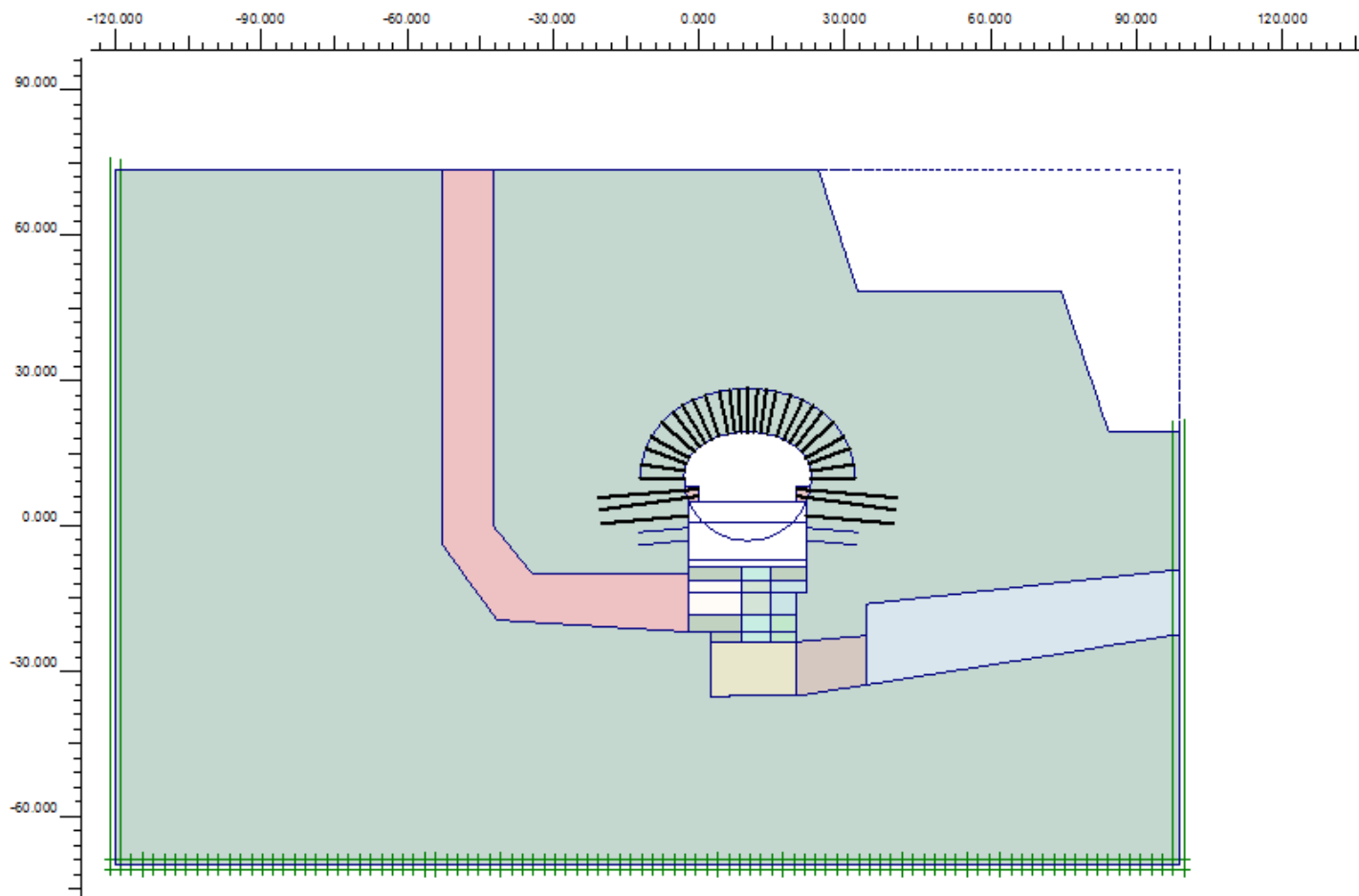




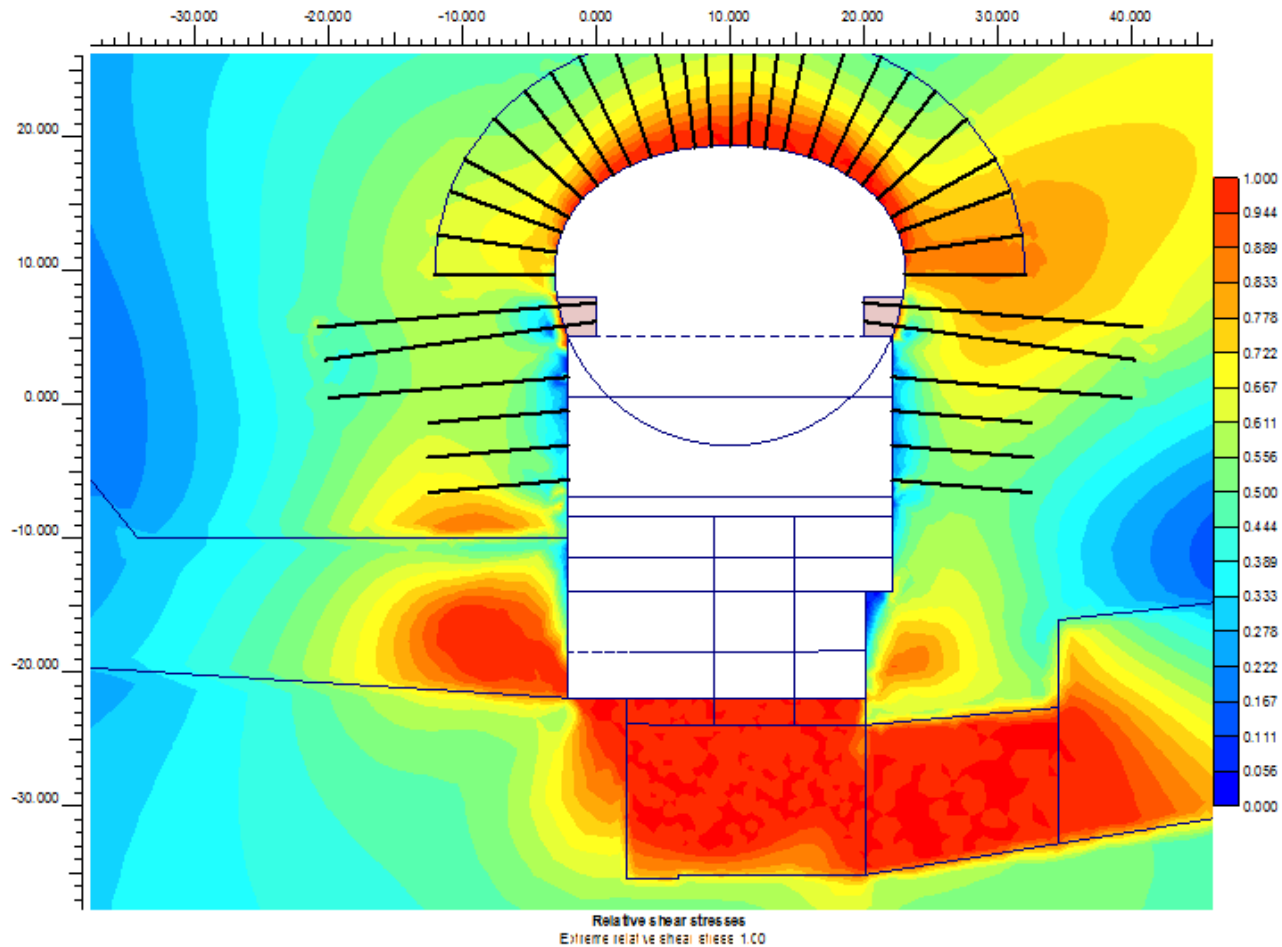




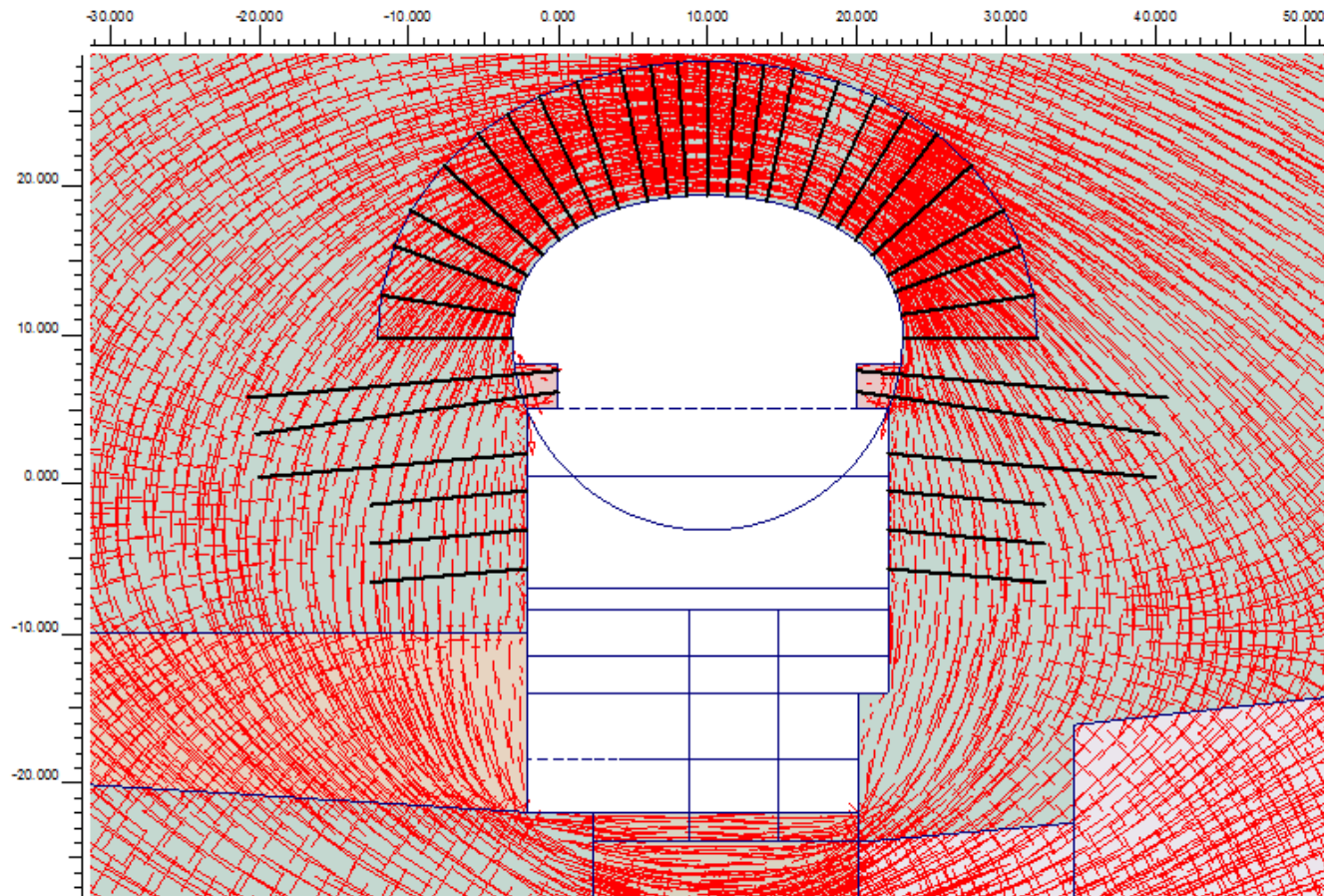




# Índice de estabilidad local



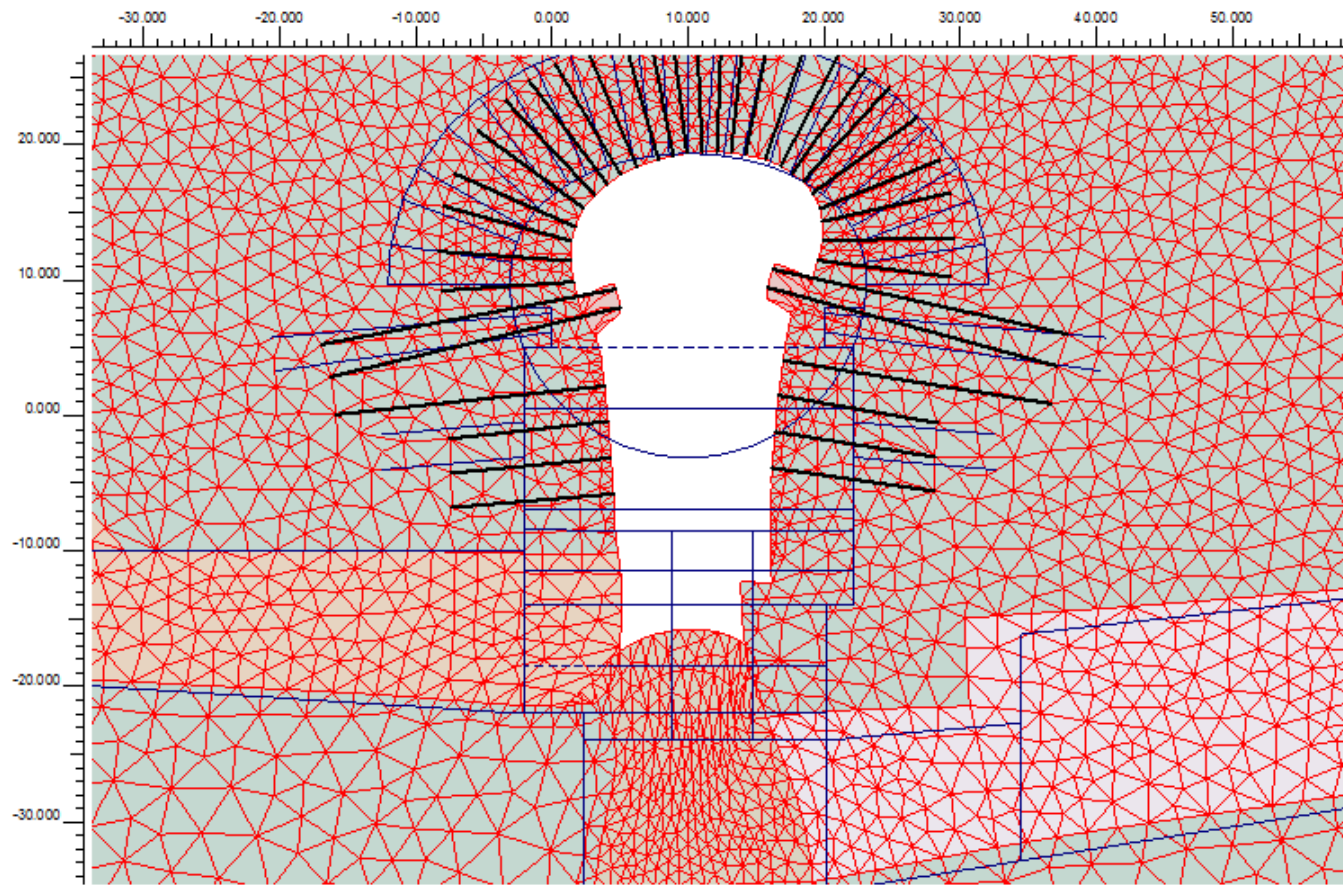
# Esfuerzos principales



Effective stresses  
Extreme effective principal stress  $-7.25 \cdot 10^2 \text{ kN/m}^2$

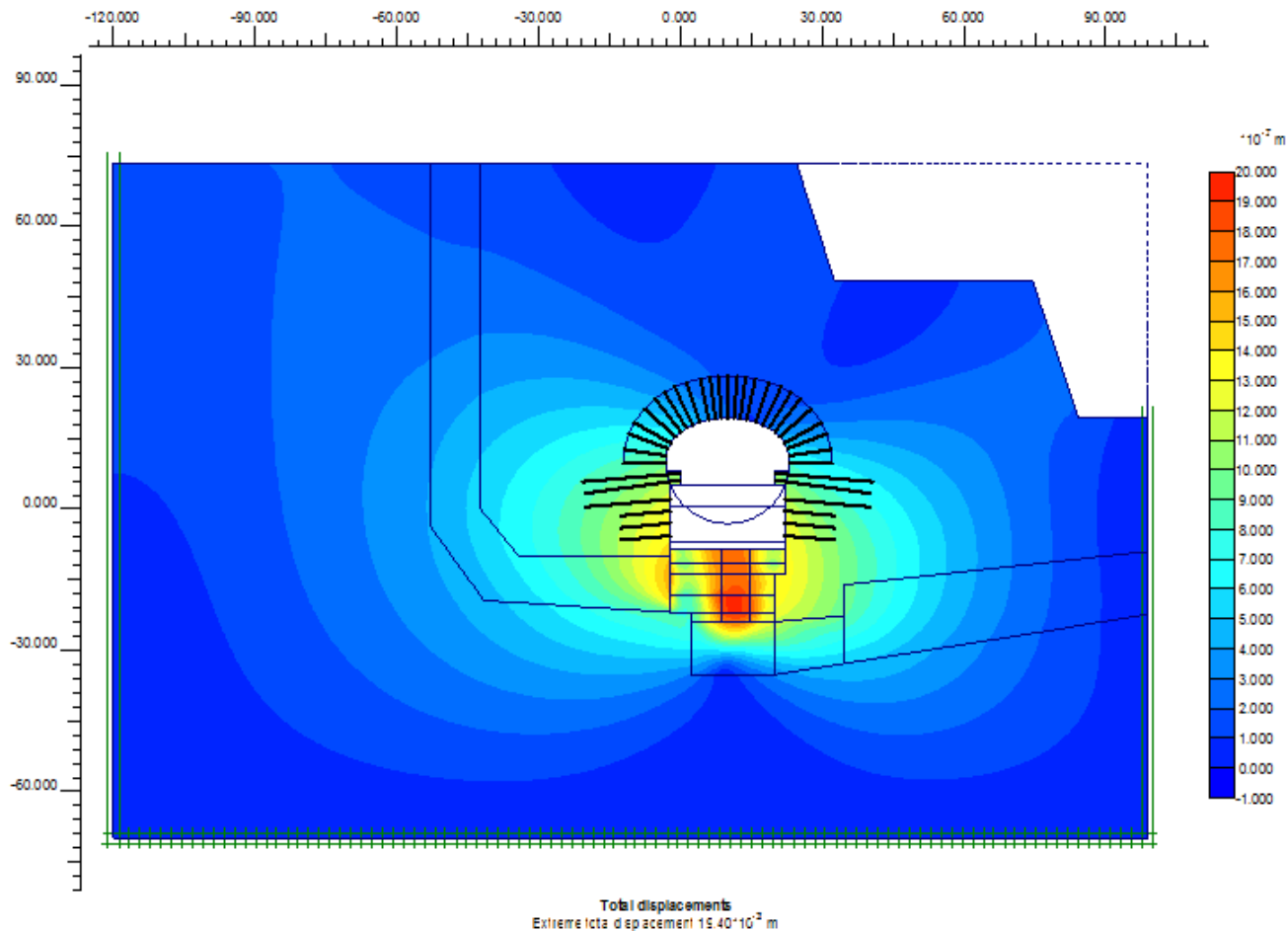


# Malla deformada

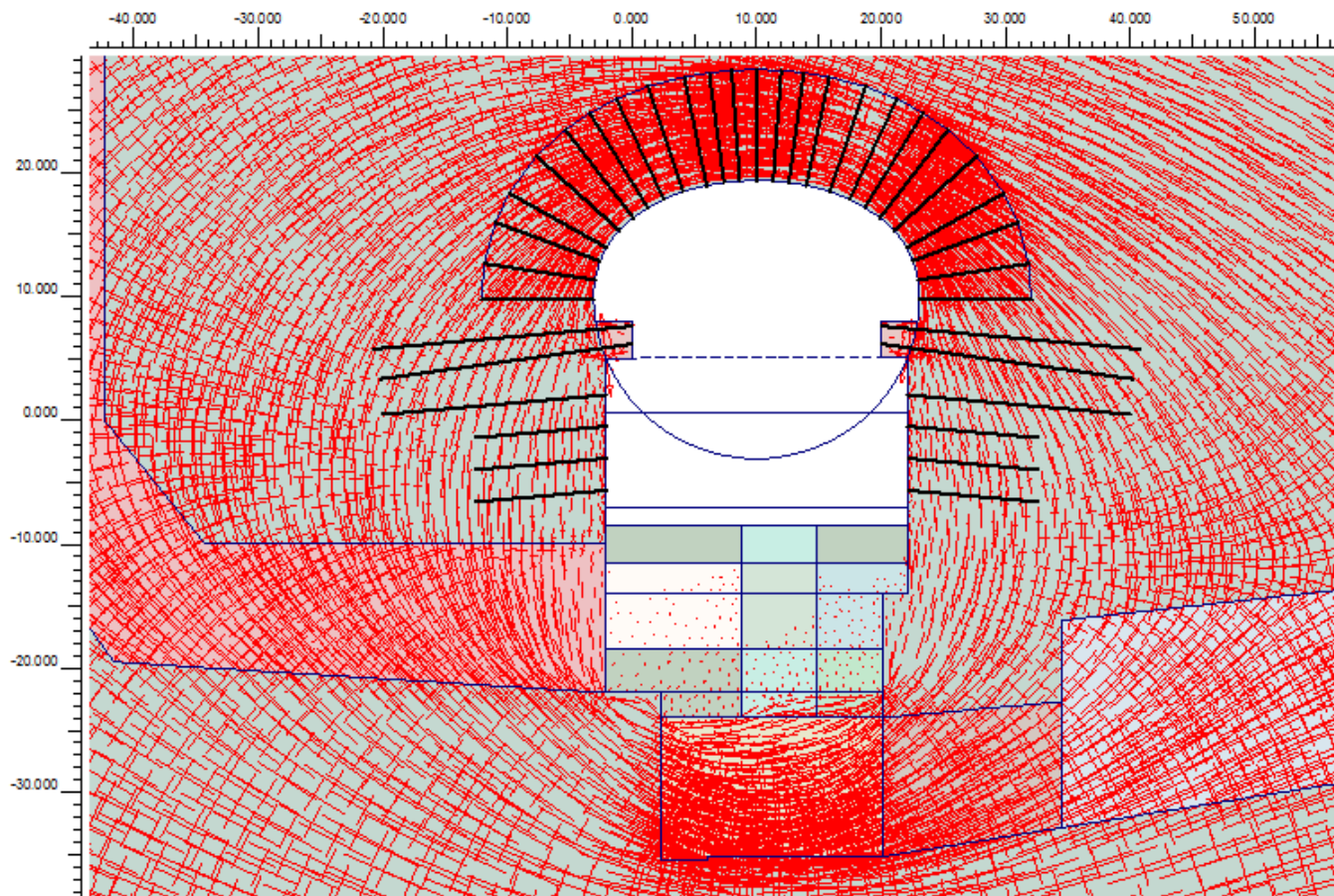


**Deformed Mesh**  
Extreme local displacement  $14.45 \cdot 10^{-2}$  m  
(displacements scaled up 500.00 times)

# Desplazamientos después de hormigonado

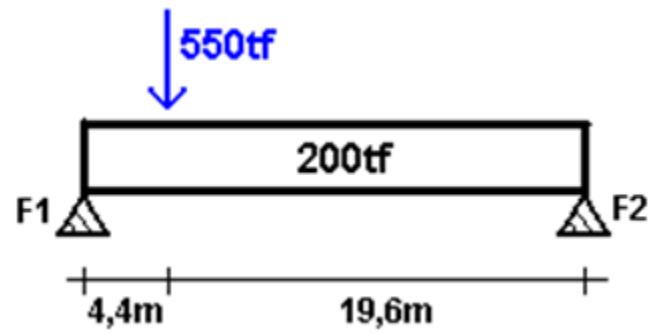


# Esfuerzos principales después del hormigón



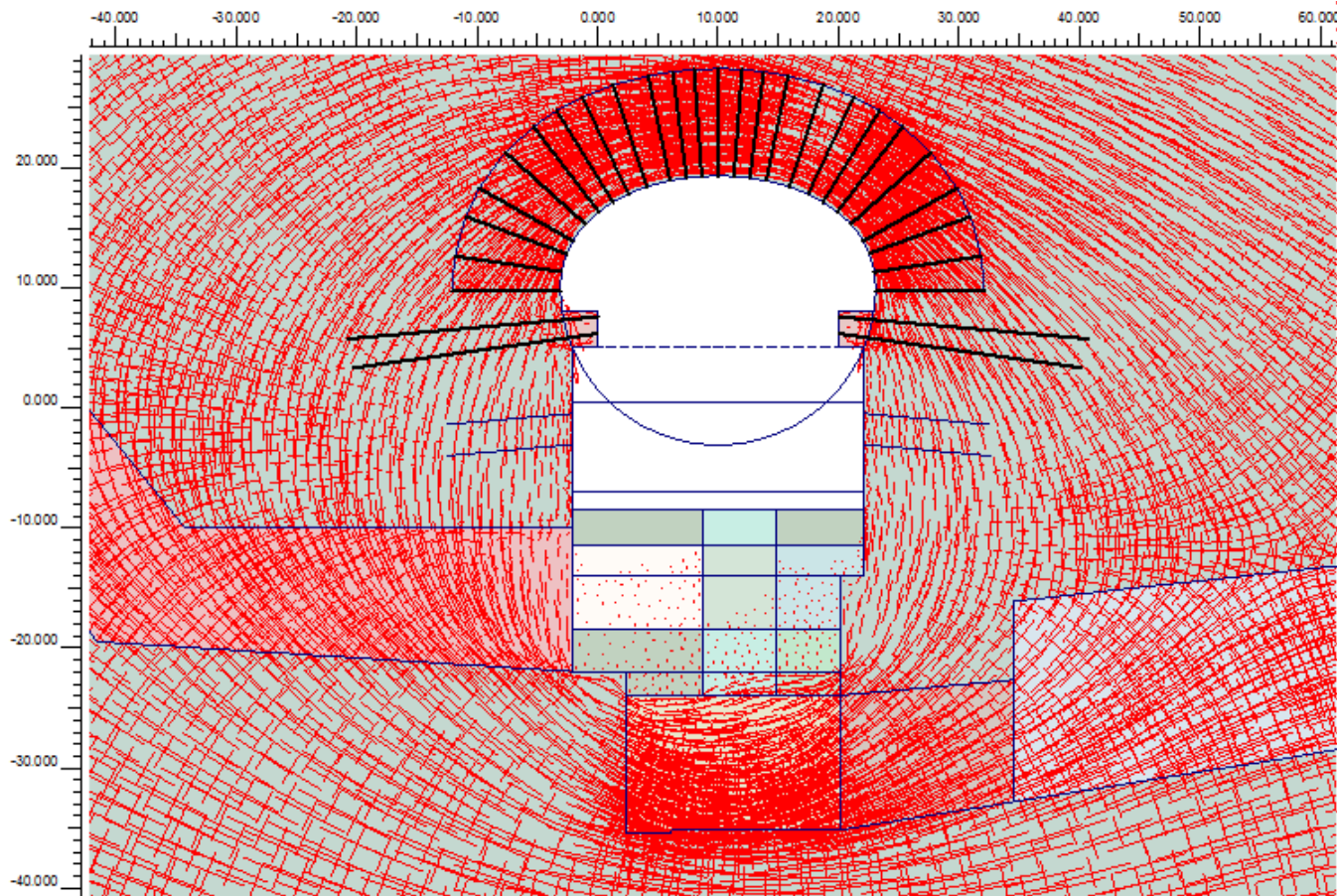
Effective stresses  
Extreme effective principal stress  $-8.70 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$

# Grúa



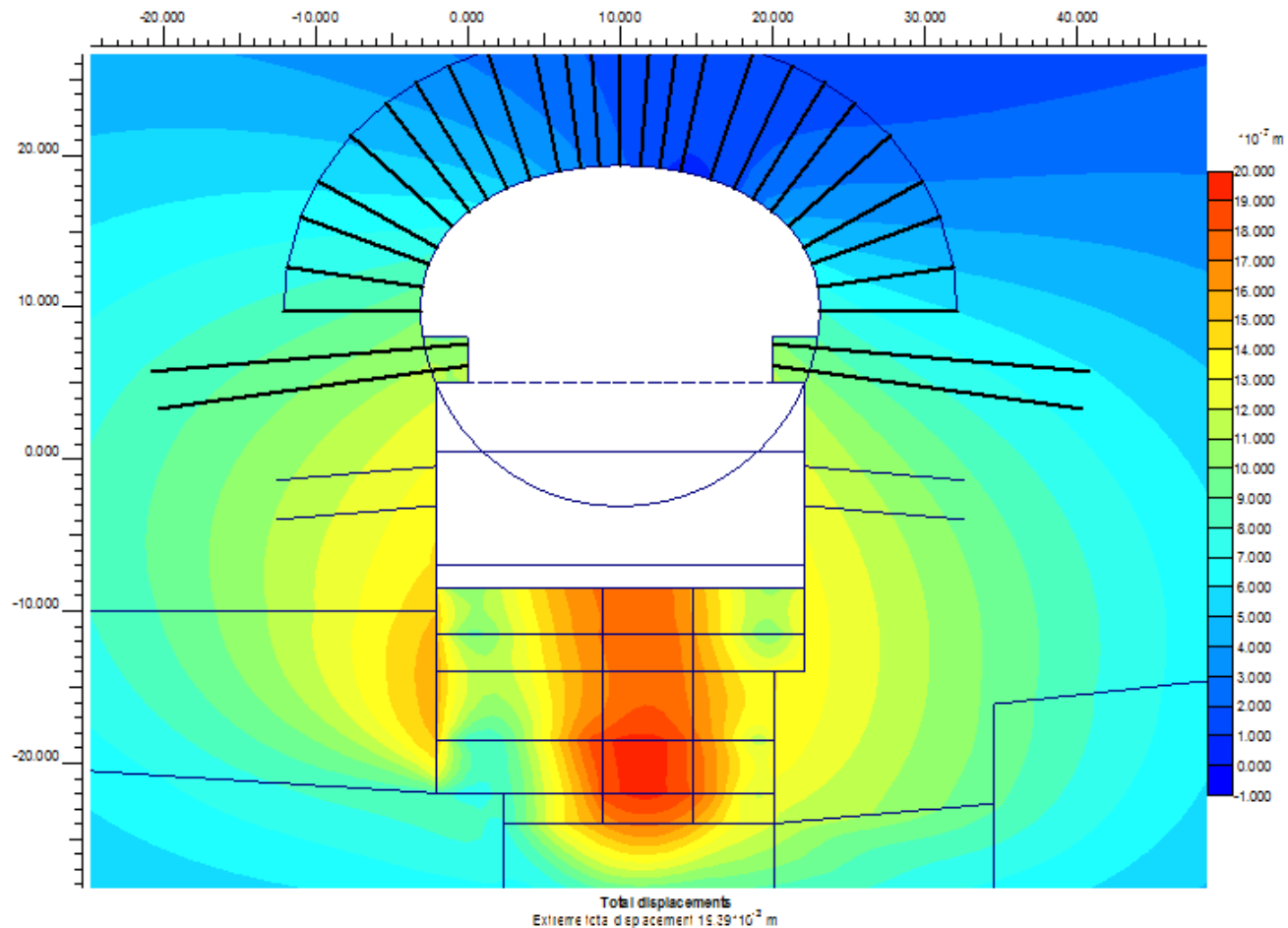


# Sin pernos



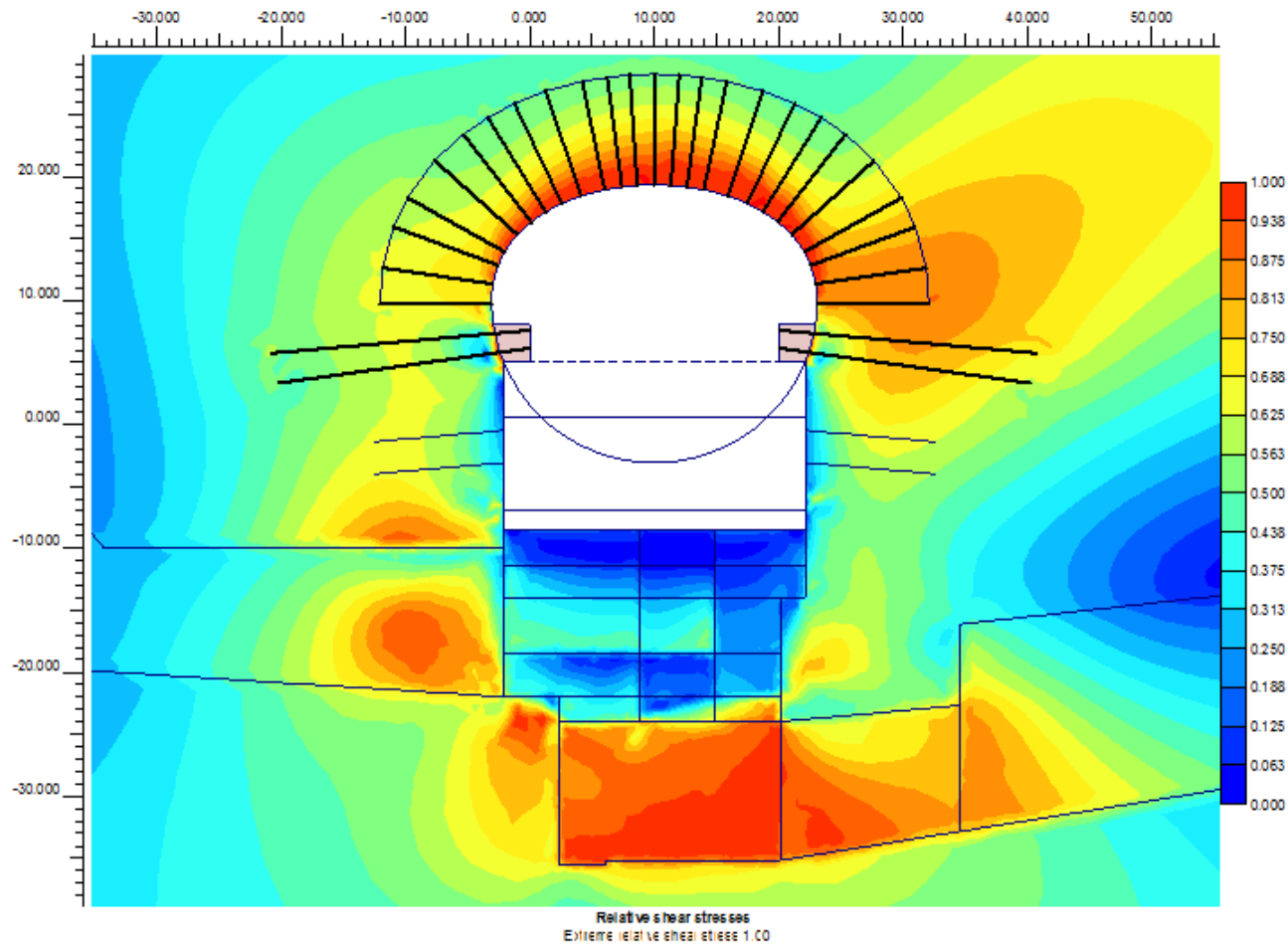
Effective stresses  
Extrema effective principal stress  $-8.70 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$

# Desplazamientos – sin pernos

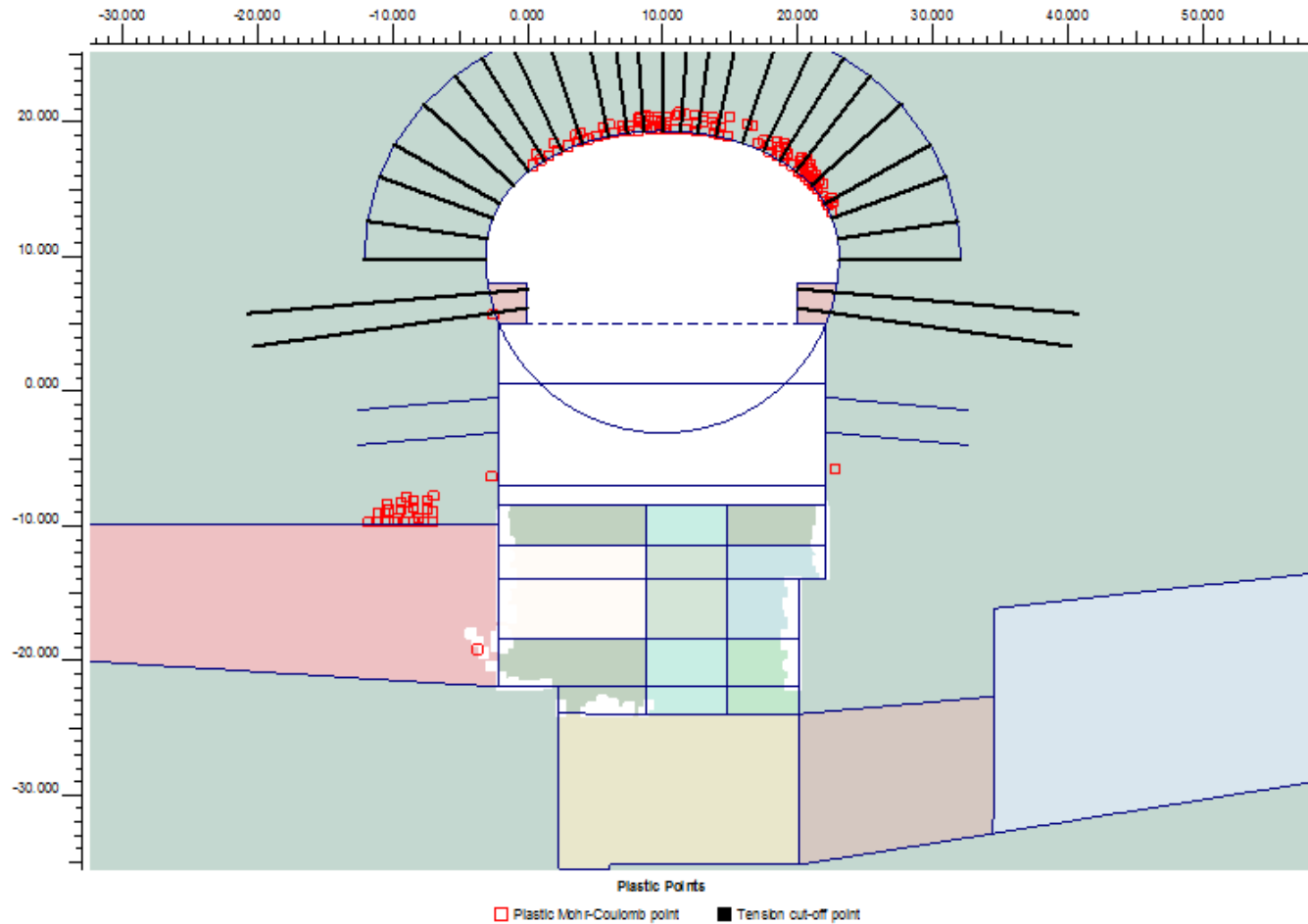




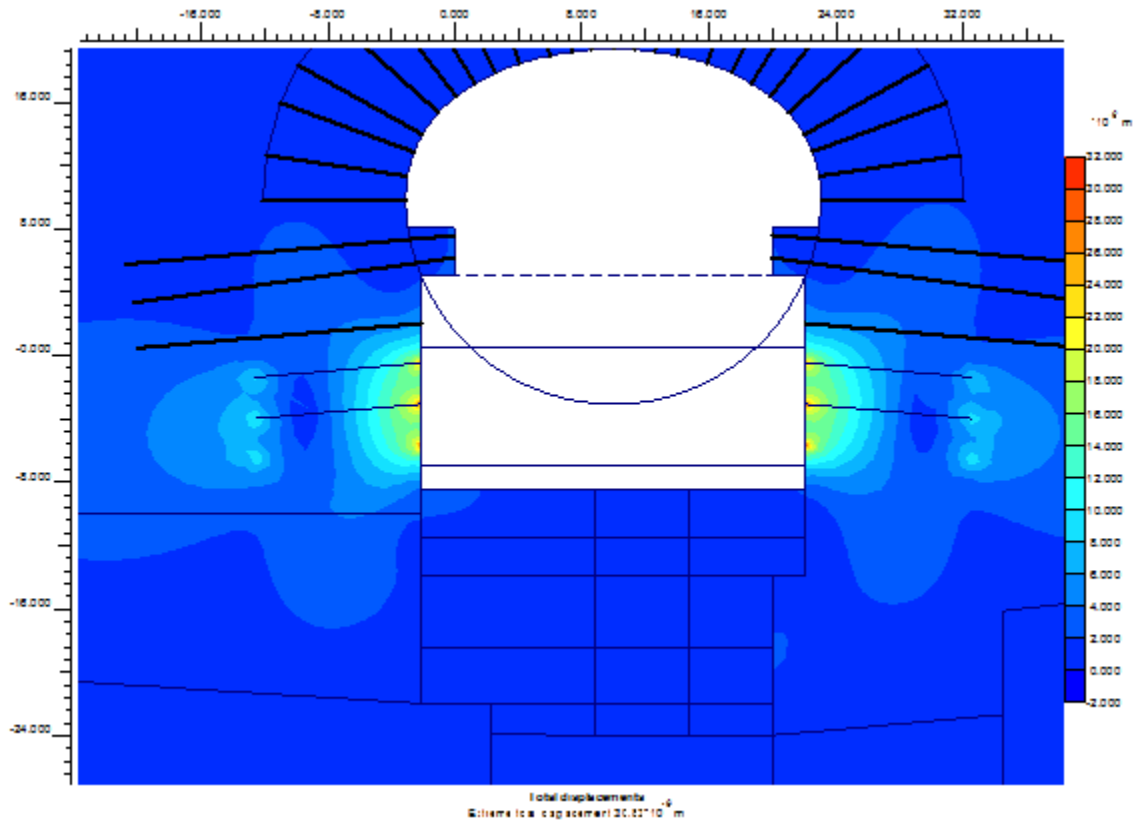
# Índice de estabilidad – sin pernos



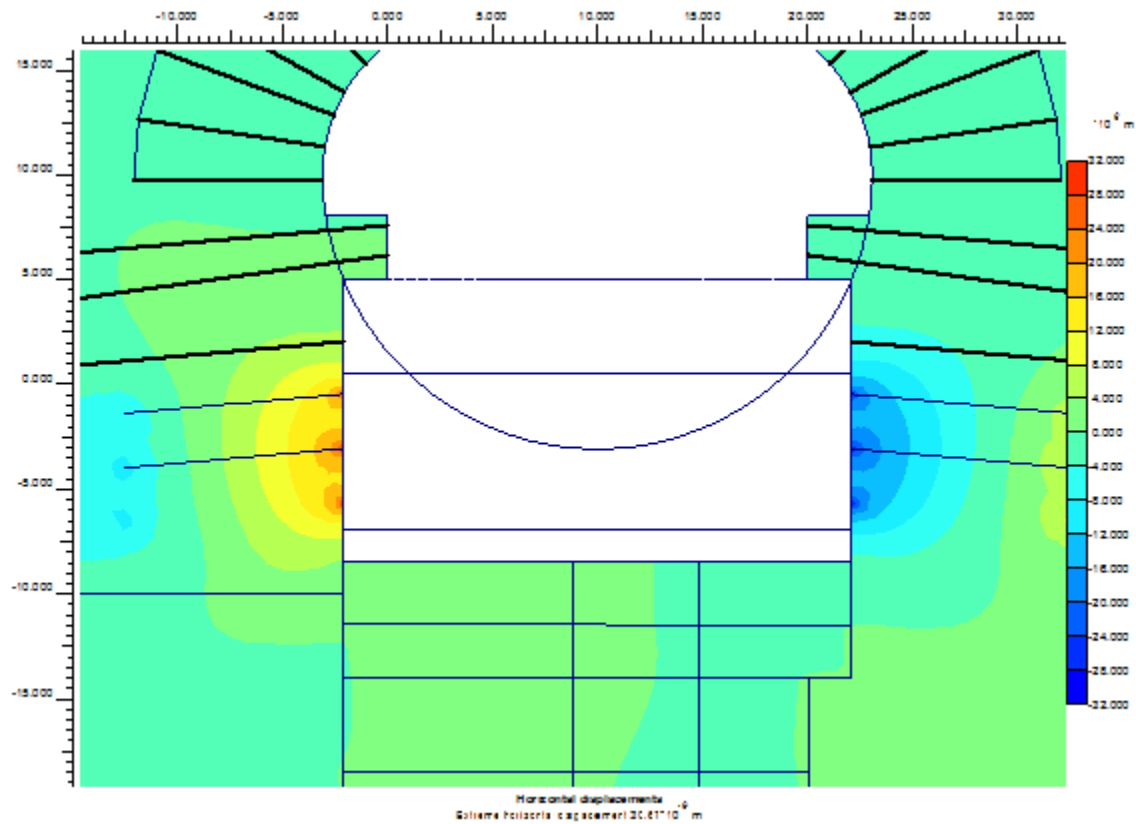
# Puntos de plastificación - sin pernos



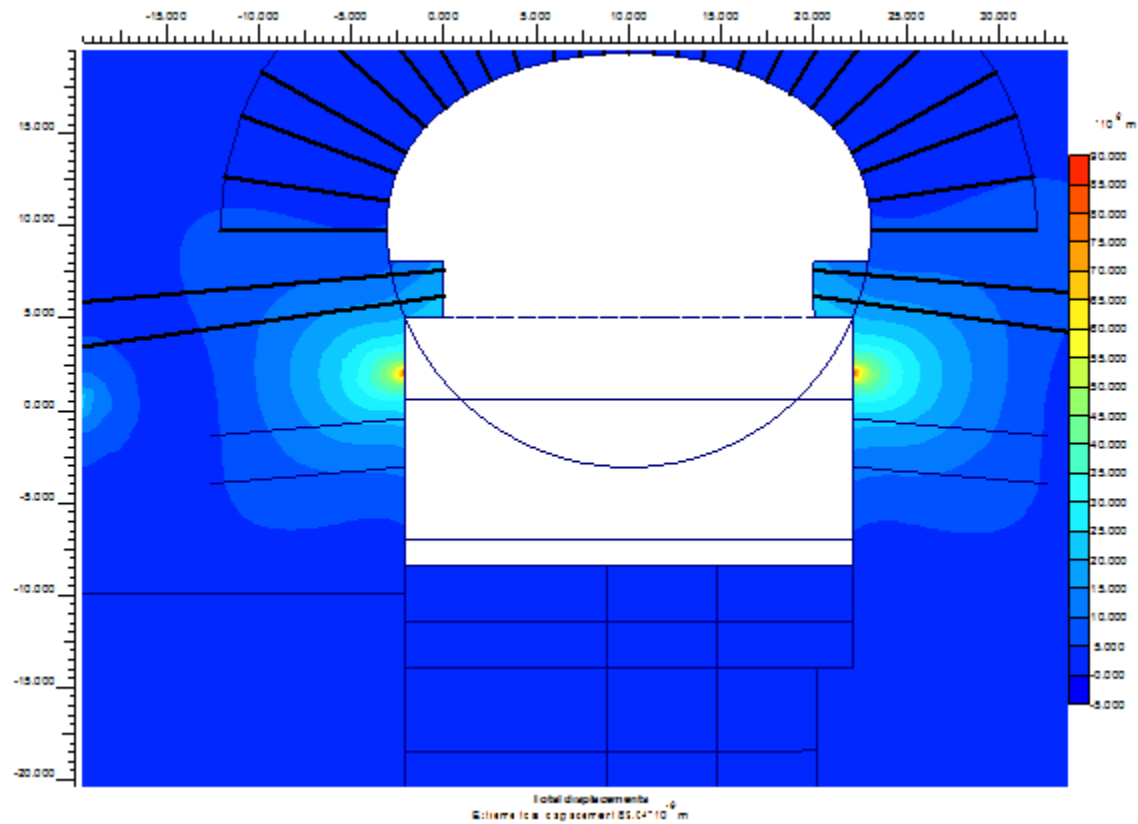
# Desplazamientos totales – pernos retirados



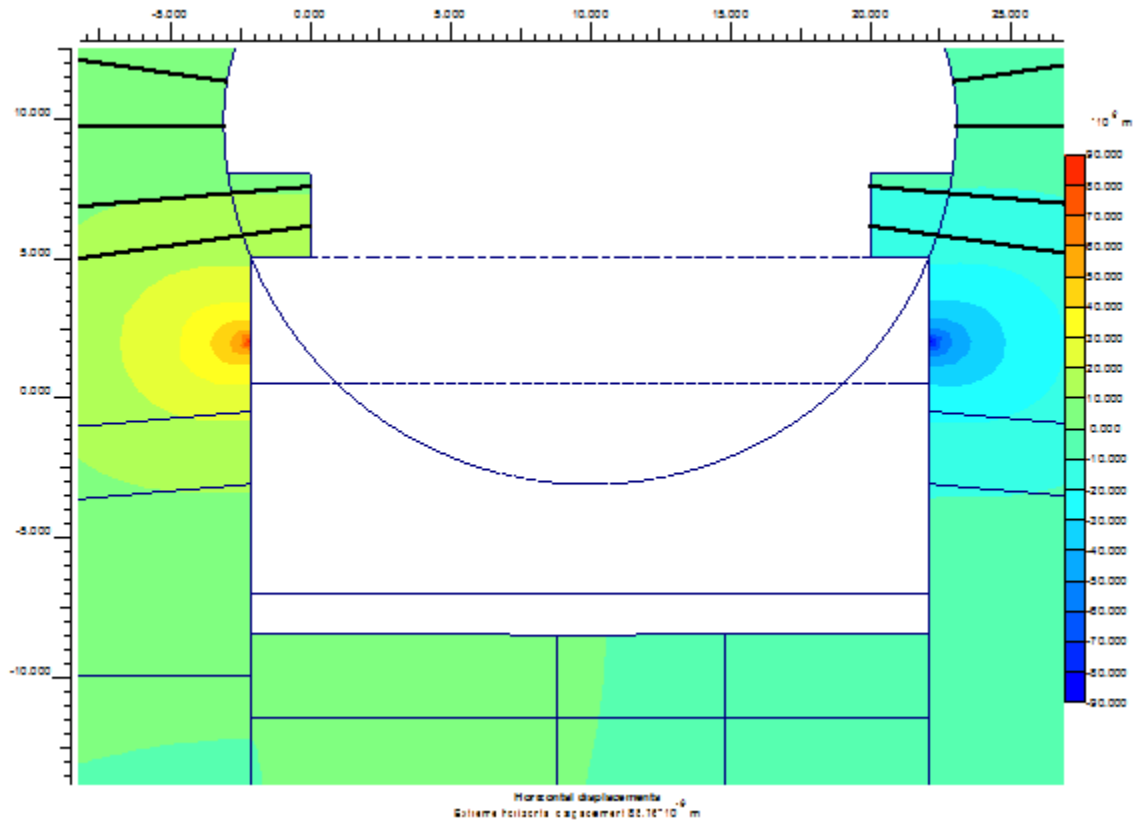
# Desplazamientos Horizontales – pernos retirados



# Desplazamientos totales– tendones retirados

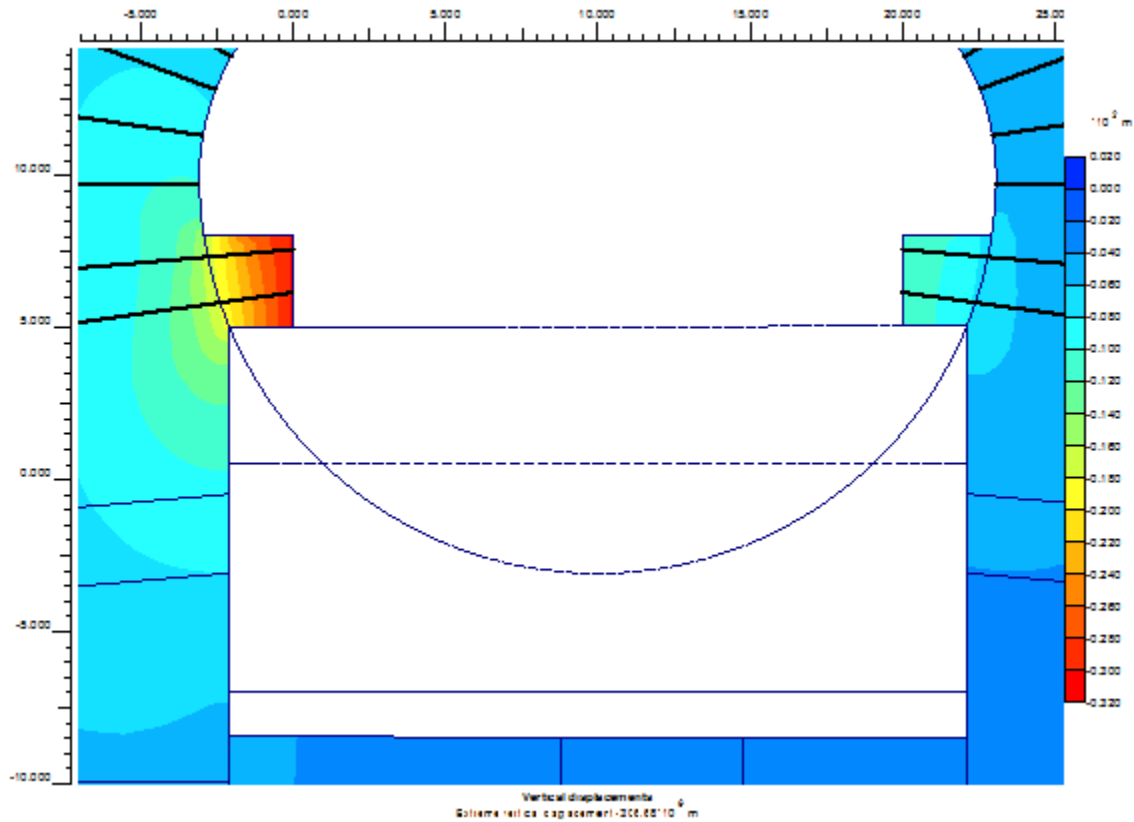


# Desplazamientos horizontales – tendones retirados

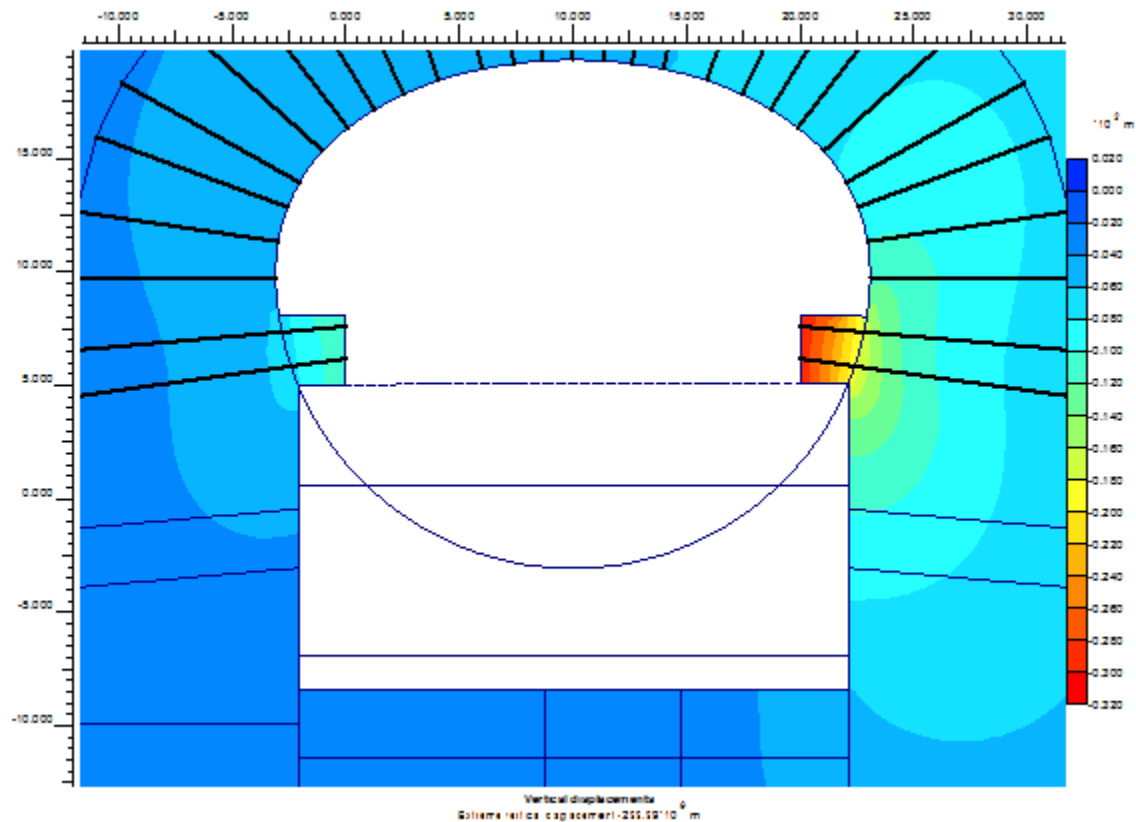




# Desplazamientos verticales – grúa rio arriba

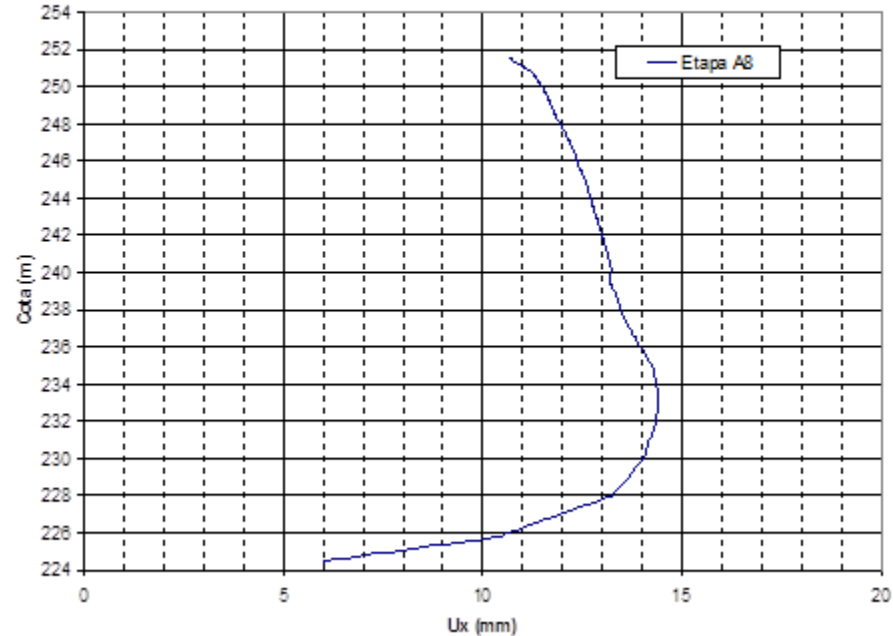


# Desplazamientos Verticales – grúa rio abajo



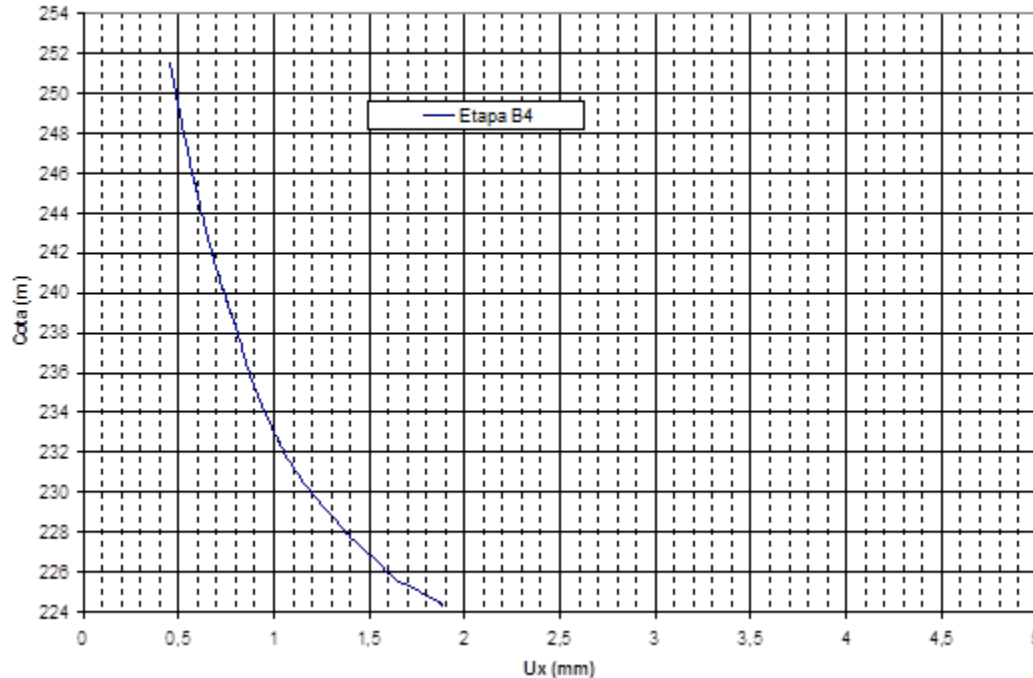
# Desplazamientos horizontales – excavación de la pared río arriba

Figura 90. Deslocamentos Horizontais Acumulados entre as Etapas A3 e A8  
Parede de Montante



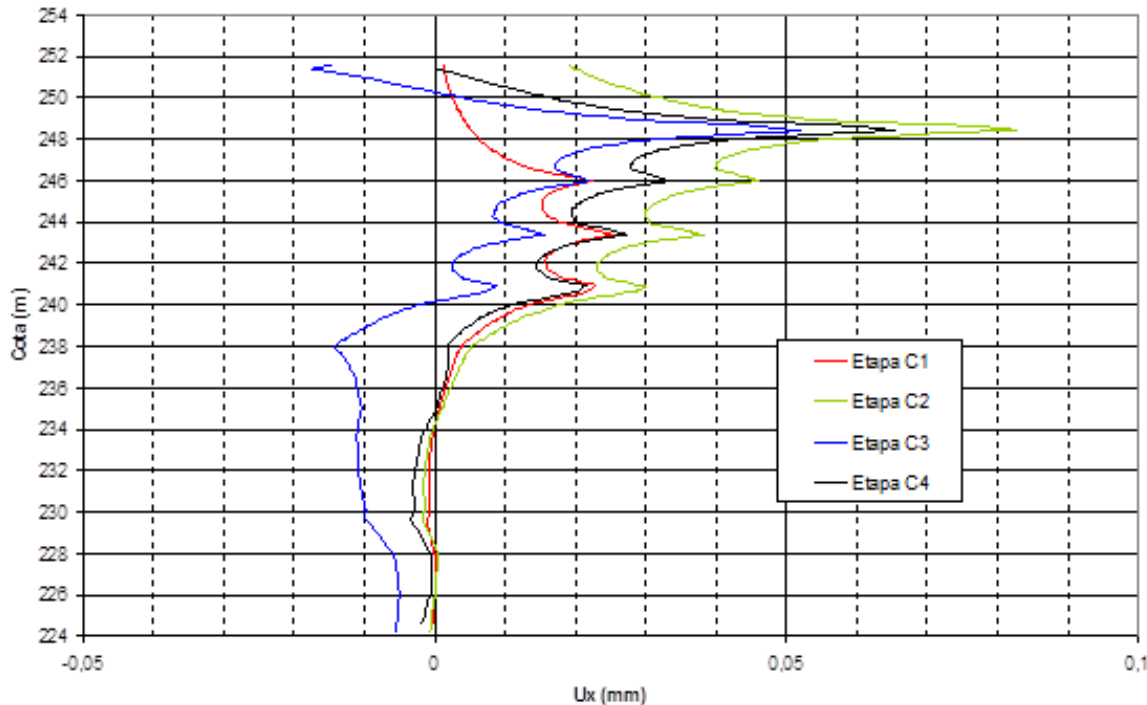
# Desplazamientos horizontales – colocación de hormigón

Figura 92. Deslocamentos Horizontais Acumulados entre as Etapas A8 e B4  
Parede de Montante



# Desplazamientos horizontales

Figura 94. Desplacamientos Horizontales Acumulados entre as Etapas B4 e C1, C2, C3 e C4  
Pared de Montante



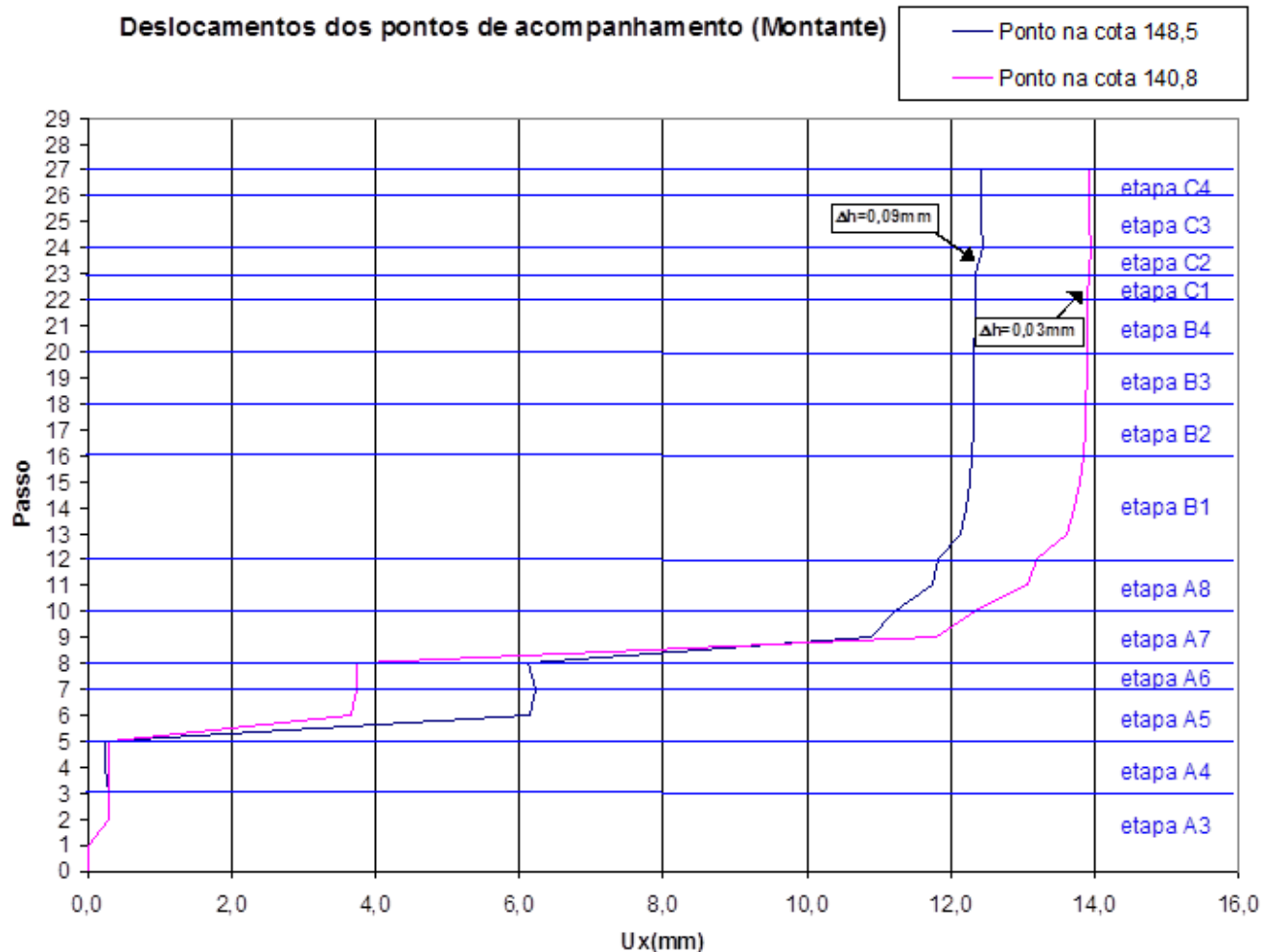
C1 – pernos retirados

C2 – tendones retirados

C3 – grúa río arriba

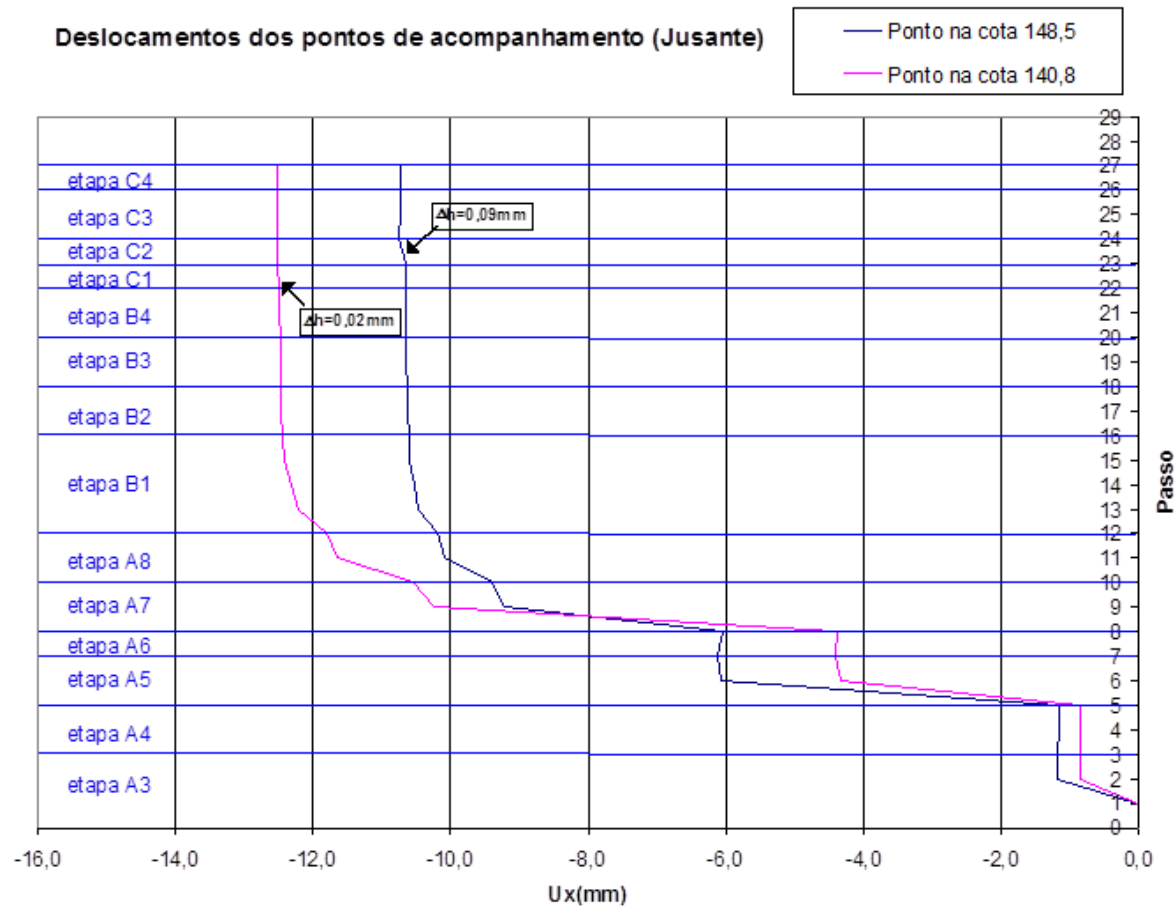
C4 – grúa río abajo

# Histórico de deslocamentos – pared río arriba





# Histórico de deslocamentos – pared río abajo



# Conclusiones

- Pernos y tendones arriba de la cota 148,5m pueden ser retirados sin comprometer la estabilidad de la caverna;
- Retirada apenas cuando necesario. Cuidados durante la operación (liberación instantánea de energía de deformación);
- Pernos de 22.5tf entre las cotas 144,00m y 150.00m deben ser preservados e inspeccionados
- Pernos no inyectados: rehabilitación y sustitución.

# Conclusiones (contd.)

- Pernos de 120tf en la cota 148.50m inspeccionados cuidadosamente
- Rehabilitación del sistema de instrumentación para lecturas posteriores (nunca suspender la posibilidad de lectura con referencias anteriores)

# Conclusiones (contd.)

- Necesidad de protección mejor contra la corrosión
- Necesidad de disminuir la permeabilidad del macizo (pre-inyección de macizo)
- Necesidad de continuar inspección e instrumentación