

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

Gianfranco Perri

Profesor de "Diseño geotecnico de túneles" - Universidad Central de Venezuela

TEMAS QUE LOS RELADORES HAN SELECCIONADO PARA LA DISCUSIÓN

1. Procedimientos para minimizar el movimiento del terreno durante la excavación de túneles (sistemas de excavación, mejoramiento del terreno, instrumentación necesaria para tener datos confiables).
2. Evaluación de los esfuerzos en el revestimiento (Fuerza axial y Momento flector).
3. Diseño de tubos enterrados (incluido el caso del viaducto enterrado a muy poca profundidad) e influencia de la compactación del terreno en el comportamiento del revestimiento.
4. Cuánta información (exploración del terreno o con sondeos, etc.) es necesaria tener para el proyecto y la construcción, y cómo entregar dicha información.

Site characterisation and requirements for tunnel and cavity design.

5. Creep behaviour in tunnels and caverns: prediction models *versus* monitoring data.
6. Numerical simulation of tunnels and cavities: 2D and 3D simulation, constitutive models for soils and linings, ground-support interaction.

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Procedimientos para minimizar el movimiento del terreno durante la excavación de túneles (sistemas de excavación, mejoramiento del terreno, instrumentación necesaria para tener datos confiables).

Sistema de excavación:

- con escudo*
 - Control de la pérdida de terreno en el frente del escudo
 - Control de la pérdida de terreno en la cola del escudo
 - Control del espacio anular en el estrados del soporte

- sin escudo*
 - Enfilajes (umbrella arch) de micropilotes o jet grouting
 - Armadura del frente y estrados con vidrioresína
 - Precorte en bóveda y arco presoporte en concreto

Mejoramiento del terreno:

- desde la superficie*
 - Inyección tradicional y jet grouting
 - Congelación
 - Armadura con micropilotes y jet grouting

- desde el subterráneo*
 - Rigidización del frente con vidrioresína

Instrumentación necesaria:

- necesidad*
 - Limitada confiabilidad de las predicciones de movimientos
 - Limitada confiabilidad de las predicciones de los daños
 - Limitada posibilidad de control de los imprevistos

- calidad*
 - Sofisticación *versus* Simplicidad y Confiabilidad

- cantidad*
 - Relación beneficios/costos

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Diseño de tubos enterrados (incluido el caso del viaducto enterrado a muy poca profundidad) e influencia de la compactación del terreno en el comportamiento del revestimiento.

Factores principales: **DISEÑO - MATERIALES - CONSTRUCCIÓN**

DISEÑO :

- * Tubos cerrados *versus* tubos abiertos en solera
- * Tubos metálicos *versus* tubos en concreto prefabricado
- * Fundación y recubrimiento

MATERIALES :

- * Materiales terrosos y materiales rocosos
- * Concreto pobre y concreto ciclópeo o masivo

CONSTRUCCIÓN :

- * Compactación compactación y compactación

Caso del viaducto colapsado: **ANALISIS - DIAGNOSTICO**

ANALISIS :

- * Análisis numérico 2D *versus* 3D (40 m y 15 m: 2D?)

DIAGNOSTICO :

- * Compactación (ver: **Estudio experimental de tubos enterrados**)
- * Tubos (5) adyacentes

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Cuánta información (exploración del terreno con sondeos, etc.) es necesaria tener para el proyecto y la construcción, y cómo entregar dicha información.

Site characterisation and requirements for tunnel and cavity design.

¿Qué cantidad de exploraciones ?

¡Muchas!

¿Qué calidad de exploraciones ?

¡Buenas !

Una cantidad y una calidad adecuadas (aunque relativamente costosas) de exploración y caracterización geotécnicas, se traducen casi siempre en un menor costo de construcción, como consecuencia directa de una optimización del diseño y, mas aún , como consecuencia de la objetiva reducción de los posibles imprevistos geológicos en la fase constructiva

Los métodos de diseño de tipo estadístico-probabilístico, basados en los conceptos de *confiabilidad estructural* y *probabilidad de ruptura* , son un ejemplo muy tangible de la influencia directa que sobre el dimensionado de la obra, ejerce el grado de precisión atribuible a los valores de los parámetros geotécnicos de proyecto: tal grado de precisión (*reducida dispersión*), puede aumentar notablemente con una exploración - caracterización geotécnica de cantidad y calidad adecuadas

- Exploración geofísica *versus* exploración directa con perforaciones
- Cantidad y calidad de las perforaciones *versus* profundidad de la obra
- Perforaciones orientadas : *estado del arte y estado de los costos*
- Ensayos de caracterización in situ *versus* ensayos en laboratorio
- Exploración y caracterización continuas en el frente de la excavación

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Evaluación de los esfuerzos en el revestimiento (Fuerza axial y Momento flector).

En un caso (*túnel in B.A...*), la gran potencia de los métodos numéricos (2D-FE) es utilizada simulando las leyes constitutivas del muy complejo (elasto-plástico y eventualmente dilatante) comportamiento del terreno, también aleatoriamente heterogéneo y bajo diferentes posibles condiciones hidráulicas y simulando además variaciones en las condiciones geométricas del contorno del problema.

En otro caso (*collapse of viaduct ...*), el análisis numérico (2D-FD) es utilizado para simular las etapas constructivas y para comparar una situación real con una situación ideal, además que para introducir en el análisis una condición de asimetría en las cargas aplicadas y para simular eventuales ineficiencias en las características mecánicas del material del sostenimiento.

En ninguno de los dos casos se analiza numéricamente en detalle, ni la estructura del sostenimiento en sí (geometrías, heterogeneidades, juntas, etc.), ni la naturaleza en sí y el comportamiento mecánico de las interfases entre terreno y sostenimiento y eventualmente, entre soporte primario y revestimiento definitivo.

Ambos aspectos son muy importantes y, aunque pueda resultar algo complicado, es ciertamente interesante analizar numéricamente su incidencia sobre la magnitud y la forma de los esfuerzos (fuerza axial y momento flector) resultantes en el revestimiento.

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Creep behaviour in tunnels and caverns: prediction models versus monitoring data.

¿Alguien aún tiene dudas sobre lo extremadamente complejo que es analizar y modelar el fenómeno del creep en el caso de los túneles?

¡Entonces debe leerse los tres trabajos presentados sobre este tema!

¿Alguien aún tiene dudas sobre lo importante e imprescindible que es el intenso y continuo monitoreo instrumental de campo para entender algo más sobre el comportamiento a largo plazo de las deformaciones que se producen alrededor de un túnel?

¡Entonces debe leerse el cuarto trabajo presentado sobre este tema!

FRASES PARA LA DISCUSIÓN:

"...the new 2D numerical model used, presents the novelty of using integral equation and boundary element method, associated with the finite element method and introduce infinite elements in order to simulate infinite remote boundaries ... a logical development of the mixed numerical model is its extension to 3D problems and this is already in progress ..."

"...la velocidad de avance en la excavación es un parámetro importante en el análisis de estabilidad del túnel sostenido, excavado en un medio elasto-viscoplastico ..."

"...es posible interpretar las deformaciones diferidas que se producen luego de la perforación de un túnel a partir de la disipación de la presión de poros, esto como complemento al efecto viscoplastico ..."

"...the time-dependent ground movements were induced by the volumetric compression around the tunnel primarily due to soil disturbance and decrease in piezometric levels ... the generation of consolidation in the horizontal direction, principally above the tunnel, calls for the use of 2D analysis to interpret and estimate the consolidation settlement trough ..."

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Numerical simulation of tunnels and cavities: 2D and 3D simulation, constitutive models for soils and linings, ground-support interaction.

1. Collapse of a viaduct built with fill and tunnel lining (*Abramento and others*)
2. An overview of the numerical and explicit solutions available for subsidence evaluation above large deep cavities (*Menezes*)
3. Tunnels in Buenos Aires: Application of numerical methods to the structural design of linings (*Sfriso*)
4. Análisis del comportamiento en esfuerzos efectivos de obras subterráneas (*Caicedo*)
5. Comportamiento de excavaciones con muros pantalla en las arcillas blandas de Santa Fe de Bogotá (*Moyano*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMAS QUE LOS RELATORES HAN SELECCIONADO PARA LA DISCUSIÓN

7. Procedimientos para minimizar el movimiento del terreno durante la excavación de túneles (sistemas de excavación, mejoramiento del terreno, instrumentación necesaria para tener datos confiables).
8. Evaluación de los esfuerzos en el revestimiento (Fuerza axial y Momento flector).
9. Diseño de tubos enterrados (incluido el caso del viaducto enterrado a muy poca profundidad) e influencia de la compactación del terreno en el comportamiento del revestimiento.
10. Cuánta información (exploración del terreno con sondeos, etc.) es necesaria tener para el proyecto y la construcción, y cómo entregar dicha información.
Site characterisation and requirements for tunnel and cavity design.
11. Creep behaviour in tunnels and caverns: prediction models *versus* monitoring data.
12. Numerical simulation of tunnels and cavities: 2D and 3D simulation, constitutive models for soils and linings, ground-support interaction.

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 1

Procedimientos para minimizar el movimiento del terreno durante la excavación de túneles (sistemas de excavación, mejoramiento del terreno, instrumentación necesaria para tener datos confiables)

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTA TÉCNICA**

1. Assessment of building damages due to urban tunneling (*Namba and others*)
2. An overview of the numerical and explicit solutions available for subsidence evaluation above large deep cavities (*Menezes*)
3. Monitoring of surface movements induced by underground works. Recent experiences (*Standing and others*)
4. Performance of shield tunnel in Chicago clay (*Kawamura and others*)
5. Frente mixto de túnel en la ciudad de Mexico (*Schmitter and others*)
6. Enfilajes de bulbo continuo en túneles excavados en macizos terrosos versus enfilajes tradicionales de tubos “a manchettes” (*Guatteri and others*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 2

Evaluación de los esfuerzos en el revestimiento de túneles (fuerza axial y momento flector)

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTE TEMA**

1. Tunnels in Buenos Aires: Application of numerical methods to the structural design of linings (*Sfriso*)
2. Collapse of a viaduct built with fill and tunnel lining (*Abramento and others*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 3

Diseño de tubos enterrados (incluido el caso del viaducto enterrado a muy poca profundidad) e influencia de la compactación del terreno en el comportamiento del revestimiento

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTE TEMA**

1. Estudio experimental de tubos enterrados (*Rodo*)
2. Collapse of a viaduct built with fill and tunnel lining (*Abramento and others*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 4

Cuánta información (exploración del terreno con sondeos, etc.)
es necesaria tener para el proyecto y la construcción, y cómo
entregar dicha información

Site characterisation and requirements for tunnel and cavity
design

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTE TEMA**

1. Ground property y characterization for the design of an artificial tunnel in a high-speed railway line project (*Totani and others*)
2. Minitunneling project for Alegria collector trunks (*Almeida and others*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 5

Creep behavior in tunnels and cavern: prediction models *versus* monitoring data

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTE TEMA**

1. An overview of the numerical and explicit solutions available for subsidence evaluation above large deep cavities (*Menezes*)
2. Comportamiento de un túnel excavado en un terreno elasto-visco-plástico (*Benamar*)
3. Análisis del comportamiento en esfuerzos efectivos de obras subterráneas (*Caicedo*)
4. Performance of a shield tunnel in Chicago clay (*Kawamura and others*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

tema 6

Numerical simulationos tunnels and cavities: 2d and 3d simulations, constitutive models for soil and linings ground-support interaction

*** PAPERS QUE SE ENMARCAN EN ESTE TEMA**

1. Collapse of a viaduct built with fill and tunnel lining (*Abramento and others*)
2. An overview of the numerical and explicit solutions available for subsidence evaluation above large deep cavities (*Menezes*)
3. Tunnels in Buenos Aires: Application of numerical methods to the structural design of linings (*Sfriso*)
4. Análisis del comportamiento en esfuerzos efectivos de obras subterráneas (*Caicedo*)
5. Comportamiento de excavaciones con muros pantalla en las arcillas blandas de Santa Fe de Bogotá (*Moyano*)

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Procedimientos para minimizar el movimiento del terreno durante la excavación de túneles (sistemas de excavación, mejoramiento del terreno, instrumentación necesaria para tener datos confiables).

Sistema de excavación:

con escudo

- Control de la pérdida de terreno en el frente del escudo
- Control de la pérdida de terreno en la cola del escudo
- Control del espacio anular en el estrados del soporte

sin escudo

- Enfilajes (umbrella arch) de micropilotes o jet grouting
- Armadura del frente y estrados con vidrioresina
- Precorte en bóveda y arco presoporte en concreto

Mejoramiento del terreno:

desde la superficie

- Inyección tradicional y jet grouting
- Congelación
- Armadura con micropilotes y jet grouting

desde el subterráneo

- Rigidización del frente con vidrioresina

Instrumentación necesaria:

necesidad

- Limitada confiabilidad de las predicciones de movimientos
- Limitada confiabilidad de las predicciones de los daños
- Limitada posibilidad de control de los imprevistos

calidad

- Sofisticación *versus* Simplicidad y Confiabilidad

cantidad

- Relación beneficios/costos

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Diseño de tubos enterrados (incluido el caso del viaducto enterrado a muy poca profundidad) e influencia de la compactación del terreno en el comportamiento del revestimiento.

Factores principales:

DISEÑO - MATERIALES - CONSTRUCCIÓN

DISEÑO :

- * Tubos cerrados *versus* tubos abiertos en solera
- * Tubos metálicos *versus* tubos en concreto prefabricado
- * Fundación y recubrimiento

MATERIALES :

- * Materiales terrosos y materiales rocosos
- * Concreto pobre y concreto ciclópeo o masivo

CONSTRUCCIÓN :

- * Compactación compactación y compactación

Caso del viaducto colapsado: ANALISIS - DIAGNOSTICO

ANALISIS :

- * Análisis numérico 2D *versus* 3D (40 m y 15 m: 2D?)

DIAGNOSTICO :

- * Compactación (ver: **Estudio experimental de tubos enterrados**)
- * Tubos (5) adyacentes

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Cuánta información (exploración del terreno con sondeos, etc.) es necesaria tener para el proyecto y la construcción, y cómo entregar dicha información.

Site characterisation and requirements for tunnel and cavity design.

¿Qué cantidad de exploraciones ?

¡Muchas!

¿Qué calidad de exploraciones ?

¡Buenas !

Una cantidad y una calidad adecuadas (aunque relativamente costosas) de exploración y caracterización geotécnicas, se traducen casi siempre en un menor costo de construcción, como consecuencia directa de una optimización del diseño y, mas aún , como consecuencia de la objetiva reducción de los posibles imprevistos geológicos en la fase constructiva

Los métodos de diseño de tipo estadístico-probabilístico, basados en los conceptos de *confiabilidad estructural* y *probabilidad de ruptura* , son un ejemplo muy tangible de la influencia directa que sobre el dimensionamiento de la obra, ejerce el grado de precisión atribuible a los valores de los parámetros geotécnicos de proyecto: tal grado de precisión (*reducida dispersión*), puede aumentar notablemente con una exploración - caracterización geotécnica de cantidad y calidad adecuadas

- Exploración geofísica *versus* exploración directa con perforaciones
- Cantidad y calidad de las perforaciones *versus* profundidad de la obra
- Perforaciones direccionadas : *estado del arte y estado de los costos*
- Ensayos de caracterización in situ *versus* ensayos en laboratorio
- Exploración y caracterización continuas en el frente de la excavación

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Evaluación de los esfuerzos en el revestimiento (Fuerza axial y Momento flector).

En un caso (*túnel in B.A...*), la gran potencia de los métodos numéricos (2D-FE) es utilizada simulando las leyes constitutivas del muy complejo (elasto-plástico y eventualmente dilatante) comportamiento del terreno, también aleatoriamente heterogéneo y bajo diferentes posibles condiciones hidráulicas y simulando además variaciones en las condiciones geométricas del contorno del problema.

En otro caso (*collapse of viaduct ...*), el análisis numérico (2D-FD) es utilizado para simular las etapas constructivas y para comparar una situación real con una situación ideal, además que para introducir en el análisis una condición de asimetría en las cargas aplicadas y para simular eventuales ineficiencias en las características mecánicas del material del sostenimiento.

En ninguno de los dos casos se analiza numéricamente en detalle, ni la estructura del sostenimiento en sí (geometrías, heterogeneidades, juntas, etc.), ni la naturaleza en sí y el comportamiento mecánico de las interfases entre terreno y sostenimiento y eventualmente, entre soporte primario y revestimiento definitivo.

Ambos aspectos son muy importantes y, aunque pueda resultar algo complicado, es ciertamente interesante analizar numéricamente su incidencia sobre la magnitud y la forma de los esfuerzos (fuerza axial y momento flector) resultantes en el revestimiento.

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Creep behaviour in tunnels and caverns: prediction models versus monitoring data.

¿Alguien aún tiene dudas sobre lo extremadamente complejo que es analizar y modelar el fenómeno del creep en el caso de los túneles?

¡Entonces debe leerse los tres trabajos presentados sobre este tema!

¿Alguien aún tiene dudas sobre lo importante e imprescindible que es el intenso y continuo monitoréo instrumental de campo para entender algo más sobre el comportamiento a largo plazo de las deformaciones que se producen alrededor de un túnel?

¡Entonces debe leerse el cuarto trabajo presentado sobre este tema!

FRASES PARA LA DISCUSIÓN:

"...the new 2D numerical model used, presents the novelty of using integral equation and boundary element method, associated with the finite element method and introduce infinite elements in order to simulate infinite remote boundaries ... a logical development of the mixed numerical model is its extension to 3D problems and this is already in progress ..."

"...la velocidad de avance en la excavación es un parámetro importante en el análisis de estabilidad del túnel sostenido, excavado en un medio elasto-viscoplastico ..."

"...es posible interpretar las deformaciones diferidas que se producen luego de la perforación de un túnel a partir de la disipación de la presión de poros, esto como complemento al efecto viscoplastico ..."

"...the time-dependent ground movements were induced by the volumetric compression around the tunnel primarily due to soil disturbance and decrease in piezometric levels ... the generation of consolidation in the horizontal direction, principally above the tunnel, calls for the use of 2D analysis to interpret and estimate the consolidation settlement trough ..."

UNDERGROUND WORKS AND TUNNELING

TEMA PARA LA DISCUSIÓN:

Numerical simulation of tunnels and cavities: 2D and 3D simulation, constitutive models for soils and linings, ground-support interaction.

Collapse of a viaduct built with fill and tunnel lining (*Abramento and others*)

An overview of the numerical and explicit solutions available for subsidence evaluation above large deep cavities (*Menezes*)

Tunnels in Buenos Aires: Application of numerical methods to the structural design of linings (*Sfriso*)

Análisis del comportamiento en esfuerzos efectivos de obras subterráneas (*Caicedo*)

Comportamiento de excavaciones con muros pantalla en las arcillas blandas de Santa Fe de Bogotá (*Moyano*)