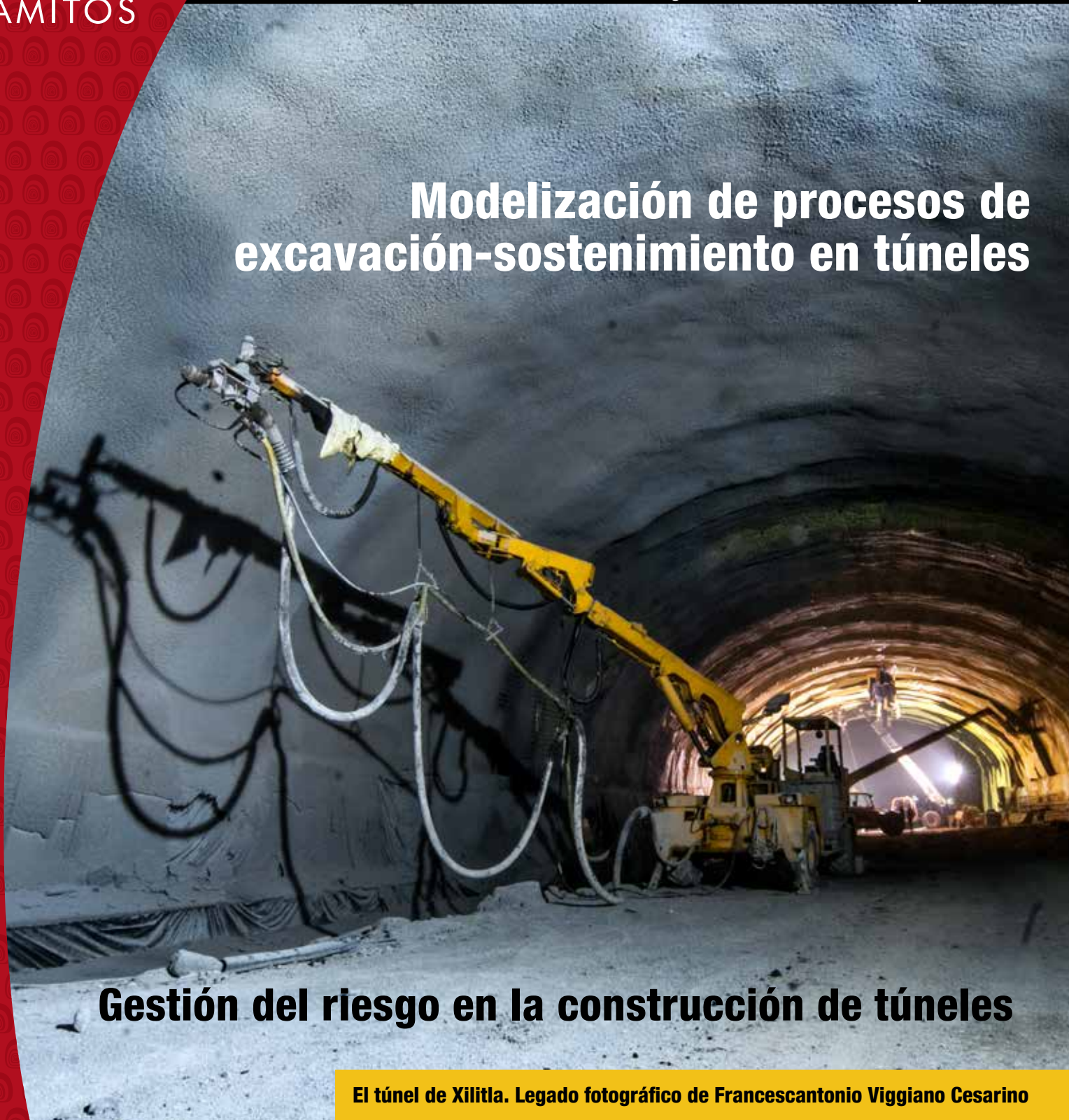
ISSN 2007-7351

AMITOS

OBRAS SUBTERRÁNEAS

Año 6 · No. 22 www.amitos.org Julio-septiembre 2018

Modelización de procesos de excavación-sostenimiento en túneles



Gestión del riesgo en la construcción de túneles

El túnel de Xilitla. Legado fotográfico de Francescantonio Viggiano Cesarino

semblanza de:

Ing. Víctor Manuel Hardy Mondragón

ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS, A.C.
XV Consejo de Directores

Experiencia de más de 25 años en suelos muy blandos en el Valle de México

ZINZANJA S.A. DE C.V.

www.zinzanja.com

Ingeniería Avanzada en Obras Subterráneas

Zinzanja S.A. de C.V.
Ceres No. 10 Col. Crédito Constructor
Del. Benito Juárez CDMX, México 03940
Tel. 0155) 53903900 / 56870541 / 56870149
www.zinzanja.com
ingenieria@zinzanja.com

Servicios integrales para su proyecto

- Microtuneleo
- Rehabilitación de tubería
- Construcción de túnel con dovelas
- Introdeslizamiento de tubería de GRP
- Microtuneleo en roca
- Hincado de tablaestacado
- Proyectos "llave en mano"
- Rehabilitación de tuneles
- Tuneliner
- Construcción de lumbreras
- Emisores Submarinos

Editorial

OBRAS SUBTERRÁNEAS

Año 6, No. 22
Julio-septiembre 2018

Fotografía: Túnel Chimalpa I, Carretera Naucalpan-Toluca, Edo. de México
Fermín Sánchez, 2015.

Estimados lectores,

Quiero aprovechar el presente medio para reiterar mi agradecimiento a los miembros de AMITOS por brindarme la oportunidad de ocupar a lo largo de estos últimos 3 años el cargo de Presidente, lo que me permitió impulsar, con el apoyo invaluable de los miembros de la Mesa Directiva de mi gestión, avances significativos, como la creación del Grupo de Ingenieros Jóvenes; la Certificación de la Maestría en Túneles y Obras Subterráneas de la ITA; la organización de un número importante de cursos, seminarios, simposios así como la representación de nuestra Asociación en diversos congresos nacionales e internacionales.

Muchas gracias a los integrantes de la XV Mesa Directiva.

También quisiera aprovechar este espacio para informar acerca de las últimas asambleas ordinaria y extraordinaria del pasado 2 de agosto, durante las cuales se realizó la elección para elegir a la XVI Mesa Directiva.

Queremos dar la más cordial bienvenida al nuevo grupo de ingenieros que conforman la mesa, quienes son asociados comprometidos con AMITOS y que buscarán seguir avanzando con los principios de la Asociación, acercando a un público de jóvenes ingenieros los conocimientos y enseñanza del arte del tuneleo y la utilización del espacio subterráneo mediante simposios, cursos nacionales e internacionales, además de la continuación de la Maestría.

También estamos seguros de que se logrará la preparación de la solicitud en el WTC 2019, Congreso Mundial de Túneles en Nápoles, Italia, para la obtención de la sede del Congreso Mundial de Túneles para México en el año 2022 (WTC 2022). Reiteramos nuestra amplia disposición y colaboración para lograrlo.

De nuevo, muchas gracias por su confianza en nombre de los miembros salientes de la XV Mesa Directiva y un servidor.

Roberto González Izquierdo
Director Ejecutivo, XV Consejo de Directores

Índice

Semblanza
Ing. Víctor Manuel Hardy Mondragón **2**

Artículo de Investigación
El túnel de Xilitla **4**

Artículos Técnicos
Modelización de procesos de excavación-sostenimiento en túneles empleando leyes constructivas tiempo-dependientes para concreto lanzado reforzado con bras de acero **7**

Gestión del riesgo en la construcción de túneles **26**

Agenda **34**

Actividades **36**

Noticias **41**

Reflexión
Túnel ferroviario Hallandsås, Suecia **42**
¿Modelizar o modelar? **43**

Relaciones con la ITA **44**

Directorio

CONSEJO EDITORIAL

Ing. Héctor Canseco Aragón
Ing. Roberto González Izquierdo
Ing. Alfredo Sánchez Gómez
M. I. Jorge López Molina
Ing. Manuel López Portillo Verdugo
Ing. Raúl López Roldán
Ing. Mario Olguín Azpeitia
M. I. Juan Paulín Aguirre
Ing. Luis Salazar Zúñiga
Ing. Juan J. Schmitter Martín del Campo
M. I. José Francisco Suárez Fino
Ing. Mario A. Torres Reyes

EDICIÓN, DISEÑO E IMPRESIÓN
XANTUS www.xantus.com.mx

XVI CONSEJO DE DIRECTORES

PRESIDENTE
M.I. Fermín A. Sánchez Reyes

SECRETARIO
Ing. Leonardo Guzmán León

TESORERO
Ing. Mario A. Torres Reyes

VICEPRESIDENTE DE COMITÉS TÉCNICOS
Ing. Jorge Armando Rábago Martín

VICEPRESIDENTE DE CURSOS Y CONGRESOS
M.I. Carlos A. Ramírez de Arellano de la Peña

VICEPRESIDENTE DE CONFERENCIAS Y PUBLICACIONES
Ing. José Anselmo Pérez Reyes

VICEPRESIDENTE DE BANCO DE DATOS, BIBLIOTECA Y REVISTA
Arq. Carlos F. Frutos Garmendia

VICEPRESIDENTE GRUPO DE INGENIEROS JÓVENES
M.I. Jorge López Molina

Derechos de autor y conexos

OBRAS SUBTERRÁNEAS, Año 6, No. 22, JULIO – SEPTIEMBRE de 2018, es una publicación trimestral, editada y distribuida por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C., Camino a Santa Teresa 187, Col. Parques del Pedregal, Delegación Tlalpan, C.P. 14010, Tel. 52 (55) 5528 3611, AMITOS amitos@amitos.org

Editor responsable: Roberto González Izquierdo. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04 - 2014 - 110510341700 - 102 ; ISSN 2007-7351, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Certificado de Licitud de Título y Contenido No. 16174, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por Ideas Xantusii, S.C.
Este número se terminó de imprimir el 19 de octubre de 2018 con un tiraje de 1,000 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización fehaciente de los autores.

SEMBLANZA

Ingeniero Víctor Manuel **Hardy Mondragón**

El ingeniero Víctor Manuel Hardy Mondragón nació en el año de 1946 en el seno de una familia de ingenieros. Su abuelo, Federico Hardy, vino de Inglaterra a construir túneles y ferrocarriles y dos de sus trece hijos, su tío Poncho y su papá, siguieron sus pasos y fueron ingenieros civiles. Sus primeras experiencias en un túnel fueron en la presa de Tingambato, Valle de Bravo y Apulco, La Soledad, donde su padre estaba a cargo de las excavaciones subterráneas. A los 15 años comenzó a trabajar como ayudante de perforista, llegando a ser jefe en turno con Juan Vázquez, quien le enseñó sobre manejo del equipo y explosivos, a "sentir" los tiempos de los estopines para lograr tronadas adecuadas y a manejar las locomotoras "Plymouth".

Tras Apulco, siguió Infiernillo, proyecto en el que, siendo ya un estudiante de la UNAM, aprendió a calcular diagramas de barrenación, carga y ventiladores; y a controlar las variables de los ciclos de excavación. Uno de los mayores problemas era la rezaga del material de la voladura, siendo uno de los mejores consejos el tener siempre una vía en perfectas condiciones mediante una cuadrilla de vía, un buen sistema de drenaje y gato de escalera en cada locomotora para evitar ir hasta el portal de entrada a conseguirlo. La ventaja de estas previsiones era que los trenes transitaran a la mayor velocidad posible y con toda la seguridad necesaria. Sus tres principales mentores además de su papá fueron Don Pepe Guerrero Arcocha en los explosivos y patrones de voladura; Raúl Cuellar Borja, quien le enseñó a "oler e interpretar" la roca por excavar; y Don Antonio Sánchez Aldana, de quien aprendió los diversos tipos de explosivos y su uso más eficiente, así como la forma de usar los tiempos en los estopines.

Terminando la carrera de Ingeniería Civil en la UNAM, viajó a la Universidad de California en Los Ángeles para estudiar ingeniería económica con una beca de ICA. Colaboró con la empresa A.A. Mathews en el proyecto del Alto Anchicayá en Colombia. Al terminar sus estudios de maestría, fue asignado a ese proyecto en el área de planeación con Fernando García Eguiño y Emilio Montemayor. Más tarde, fue superintendente de la lumbrera 13 del Interceptor Central, con Andrés Moreno y Enrique Farjeat, su primera experiencia con los escudos de frente abierta. Basándose en libros de la época de su abuelo, pudo diseñar "sapos" para las vías y "cross overs" para acelerar la rezaga del material excavado.

De ICA, pasó a la entonces Constructora Ballesteros (después Grupo Mexicano de Desarrollo), comenzando como jefe de control de obras y llegando a ser Gerente General de DINFRA. Trabajó en el túnel de desvío de la presa El Comedero y construyó los túneles inclinados de las minas de carbón Mimosa II y III.

En MICARE fue Director de Operaciones y construyó las minas subterráneas I y II y los tajos a cielo abierto; terminando la mina I en tiempo récord para un tiro inclinado; mientras que para llegar al carbón en la mina II, se enfrentó a flujos de agua de hasta 300 m^3/seg. Construyó de manera exitosa un sistema de pozos para abatimiento de nivel freático y un diseño de losas que evitaran la flotación del piso.

Tras una serie de eventos, visitó a Andrés Moreno en la CFE quien le invitó a visitar el P.H., Zimapán para supervisar el túnel de conducción. Durante ese proyecto se aceleró la excavación del túnel para evitar el uso de una tercera cimbra. Más tarde, ocupó el cargo de Director Operativo en un Bufete Industrial donde no realizó ningún trabajo subterráneo; pero GMD, junto con otras empresas (La Nacional y Odebrecht), lo invitaron a volver a las hidroeléctricas. Fue el representante de GMD en el Consejo de Directores, haciendo una excelente mancuerna entre La Nacional, Odebrecht y GMD, siempre anteponiendo el proyecto a los intereses de las empresas. Siendo Director del Área Internacional de GMD, participó en la red de distribución de agua potable de Buenos Aires con Benito Roggio (Argentina), GMD y la gran aportación de DIRAC (México), al ser su diseño el elegido para el revestimiento del túnel.

Tras la devaluación de 1994, GMD tuvo que abandonar los proyectos La Miel en Colombia y El Estí en Panamá, así como un proyecto en Ecuador. Tras ese suceso, se interesó en resolver los reclamos que GMD tenía con varios organismos gubernamentales. Tras presentar varias inconformidades y reclamos que fueron exitosos, decidió dedicarse a ese aspecto de la construcción: la administración de contratos; bitácora, programas y su actualización constante y la correspondencia con el cliente. Participó con ISA Ingeniería en la solución de reclamos y controversias para diversas empresas, siempre con la acuciosidad de Gustavo Meillón.

Más tarde, colaboró en la solución de controversias y reclamos entre PEMEX y las empresas constructoras que participaban en Cantarell, logrando que en dos años el proyecto avanzara de un 25% a un 85%, solucionando los reclamos y controversias con un grupo multidisciplinario, siendo el líder técnico. Luego formó parte de una empresa que se dedicaba a resolver controversias en la parte técnica. Decidió que era necesario hacer un diplomado en arbitraje en la Escuela Libre de Derecho y tras graduarse ha participado como perito y tercero experto en arbitrajes, opiniones y asesorías en diversos temas de construcción de infraestructura.

Sus logros profesionales son gracias a las personas que siempre lo guiaron, lo regañaron, le enseñaron a tomar decisiones a pesar de sus equivocaciones y sobre todo creyeron en él, especialmente Fernando Favela Lozoya, que siempre estuvo presente en sus logros profesionales y con su incondicional amistad.

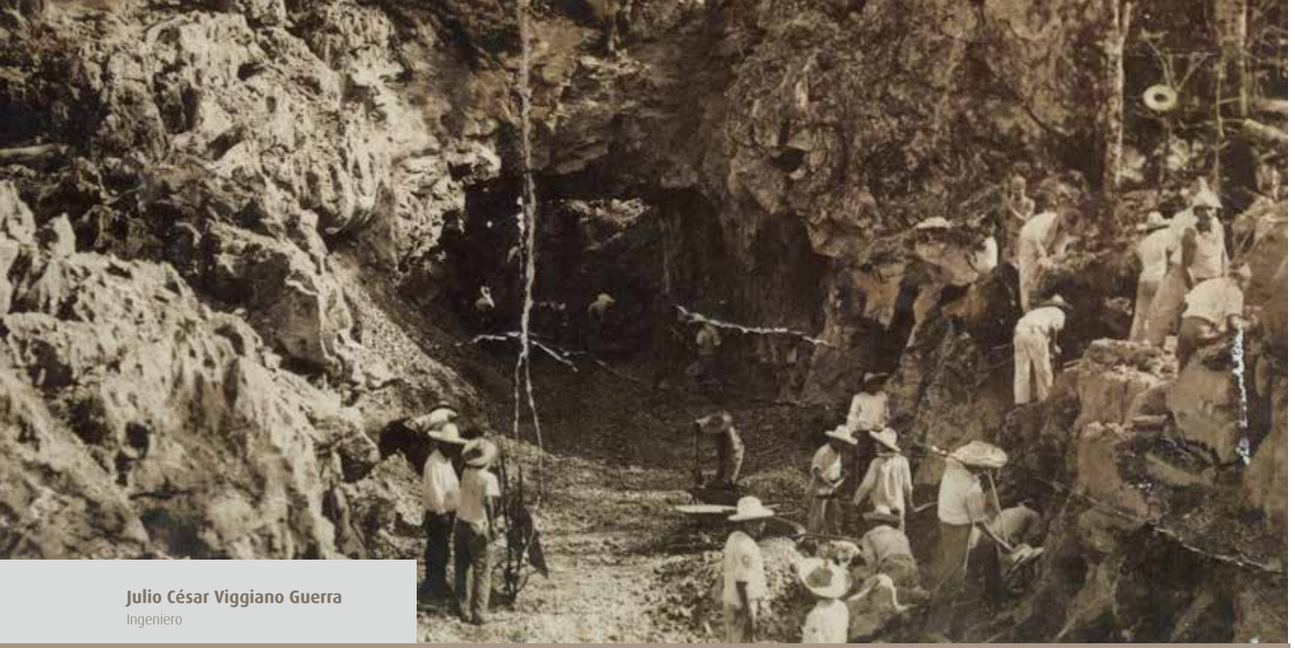
BESSAC méxico

Tecnología de **vanguardia en obras subterráneas**

Microtuneleo con TBM
Hincado de tubería (pipe Jacking)
Construcción de túneles con dovelas
Rehabilitación de tuberías
Tablestacado metálico
Muro Milán

www.bessac.com.mx

Tel.: (+52 55) 5207 3068



Julio César Viggiano Guerra
Ingeniero

El túnel de Xilitla

Legado fotográfico de Francescantonio Viggiano Cesarino

Oriundo de Torraca, Salerno, Italia (1871), pequeña población ubicada en la provincia de la Campania en el sur de ese país, Francestantonio Viggiano Cesarino arribó a México por el año de 1888, estableciéndose en Xilitla, San Luis Potosí. De oficio natural cobrero, desarrolló simultáneamente el amor y la habilidad por la fotografía. Esta última tarea no era nada simple, debido a los grandes retos que planteaba la tecnología en aquellos años, en comparación con todo lo que este arte puede proporcionar ahora, merced al gran avance científico y tecnológico. Así, durante esa época, logra plasmar en su arte fotográfico una gran parte de la historia gráfica de Xilitla, entre la post Revolución Mexicana y la Segunda Guerra Mundial. Fracescantonio capta con su cámara un verdadero hito histórico para la población de Xilitla, desde siempre destinada a las cosas grandes: se trata nada más y nada menos que de la entrada del general Lázaro Cárdenas (siendo presidente de México) al poblado, desde un camino real, ubicado al norte de la plaza, dado que aún no había carretera (hecho transcurrido por el año de 1937). Cabe señalar que dicho evento es de gran relevancia para la historia no sólo de Xilitla sino de todo México, por lo que ha representado y representa la figura de Lázaro Cárdenas en la historia de nuestro país, si bien, desafortunadamente, no se conmemora en Xilitla.

Además, Viggiano Cesarino nos deja un legado artístico-fotográfico de la construcción de la antigua y bella carretera (prácticamente en desuso) que comunica a Xilitla con la

▲ Autobús de pasajeros ca. 1934.

▲ Chalán que cruzaba el río Huichihuayán.

▲ Trabajos de perforación del túnel.

"Y griega", ahora la "Y griega vieja". De esta suerte, su fotografía nos suministra retazos de un recorrido que surca la selva xilitlense, desde las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, cruzando el río Huichihuayán, mediante un bello y folclórico chalán e introduciéndose por las rocas cavernosas calcáreas hasta arribar a Xilitla tras un embriagante viaje de 21 km. El susodicho trayecto respeta el paisaje natural, dejando bellos legados escénicos del relieve cavernoso, tales como cañones, cuevas, acantilados y por supuesto, la riqueza de la flora y de la fauna. En cuanto a rasgos intactos, llaman la atención la cueva del Cañón y las gargantas de los Cajones; pero el rasgo más bello es el túnel que se construyó aprovechando la cavernosidad de la roca y dejándolo como un adorno en la parte alta de la sierra desde donde ya casi se divisa el poblado de Xilitla. Obviamente, por debajo del mismo han pasado desde casi un siglo ingentes cantidades de vehículos motorizados. Encima del mismo la selva está intacta. Es un túnel de muy poca altura (3-4m) y muy corto (5-6m). De hecho, camiones grandes y estruendosos no podían entrar al pueblo, cosa maravillosa. Arquitectónicamente, emula un arco rebajado. Hoy en día, es lugar obligado para atletas y paseantes amantes de la naturaleza y de los bellos paisajes. Debe reconocerse que los ingenieros de la época a cargo de la construcción fueron muy creativos y respetuosos del entorno natural, pues lejos de destruir aprovecharon la roca y habilitaron el bello túnel, pasando la carretera por debajo, como ya se ha dicho. En fin, las fotografías de Francescantonio Viggiano Cesarino constituyen ese tipo de documentos muy escasos, que encierran una riqueza histórica invaluable porque dan fe del pasado del gran Xilitla.

AMITOS agradece a Emma Viggiano Gutiérrez su gran apoyo en el viaje documental realizado a Xilitla y el autor del presente artículo le agradece por el suministro del material fotográfico para su publicación.

carso
INFRAESTRUCTURA Y CONSTRUCCIÓN M.R.

Sectores Estratégicos

Agua Edificación Industria Infraestructura Hidrocarburos y energía Telecomunicaciones

TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO)

carsoinfraestructura.com

Modelización de procesos de excavación-sostenimiento en túneles

empleando leyes constitutivas avanzadas para concreto lanzado reforzado con fibras de acero

Fermín SÁNCHEZ
CONSULTEC Ingenieros Asociados S.C.
Posgrado de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México

Gabriela GARCÍA
Posgrado de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México

1. INTRODUCCIÓN

El concreto lanzado es un material que, desde hace varias décadas, constituye uno de los sistemas de sostenimiento más empleados en las obras subterráneas debido a su eficiencia en la implementación y a sus propiedades estabilizadoras y de reforzamiento. Por otro lado, los grandes avances que ha experimentado en cuanto a las técnicas para su fabricación y colocación lo convierten en un sistema de activación prácticamente instantánea que mejora las condiciones de seguridad en el proceso de excavación.

Actualmente, las necesidades que imperan en el ámbito de la ingeniería civil demandan el uso de modelos cada vez más realistas y avanzados; como consecuencia, en las últimas décadas se han desarrollado sofisticadas leyes constitutivas que describen el comportamiento de muchos tipos de materiales geotécnicos, entre ellos el concreto; paralelamente se tiene el desarrollo de algoritmos numéricos que, mediante las técnicas de elementos finitos y diferencias finitas, entre otras, permiten analizar problemas geomecánicos considerando gran parte de los factores más importantes y complejos que juegan un papel relevante en el comportamiento de una obra civil.

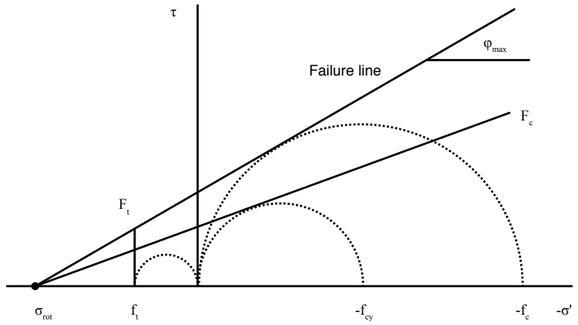
Este artículo presenta una serie de aproximaciones numéricas de varios de los fenómenos asociados al comportamiento del concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA), que comienzan con procesos de calibración de las leyes constitutivas a partir de pruebas de laboratorio específicas de este tipo de mezclas. Después, se desarrolla un ejemplo de análisis y diseño completo mediante elementos finitos y diferencias finitas, apoyados en retroanálisis, en los que se calibra el comportamiento de los modelos a la realidad instrumentada durante la obra. Se incluye también una serie de criterios de diseño estructural específicos para concreto lanzado reforzado con fibras metálicas. Todo lo anterior corresponde con un estudio realizado para la optimización de los sostenimientos de un túnel construido en la zona poniente de la Ciudad de México.

2. Modelización constitutiva

En 2016, la empresa Plaxis introdujo un modelo constitutivo específico para la simulación del concreto lanzado llamado *Shotcrete Model* (modelo SM); éste considera una superficie de fluencia tipo Mohr-Coulomb para la rama de compresión (F_c) y una superficie tipo Rankine para la rama de tensión (F_t), las cuales, al combinarse, constituyen el conocido criterio modificado de Coulomb (Figura 1).

El *Shotcrete Model* tiene una formulación basada en la elastoplasticidad clásica con endurecimiento (*hardening*) y reblandecimiento (*softening*) isótropos. Además, considera la evolución de parámetros tiempo-dependientes (módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple, etc.), la contracción por secado (*shrinkage*) y la fluencia lenta (*creep*) del material. Asimismo, el modelo cuenta con una teoría regularizadora llamada *Smeared Crack* que permite lidiar con el problema de dependencia patológica de la malla que se presenta comúnmente en la modelización de problemas de contorno al trabajar bajo estados deformacionales más allá de la rama elástica.

Por otra parte, FLAC^{3D} es uno de los programas comerciales más potentes de cálculo geotécnico y cuenta con un modelo constitutivo que también tiene una formulación basada en la elastoplasticidad clásica con *hardening* y *softening* llamado *Strain Hardening/Softening Mohr-Coulomb Model*. Este modelo constitutivo no es exclusivo para la modelización de estructuras de concreto lanzado, por lo que su formulación no cuenta con leyes tiempo-dependientes que permitan representar los fenómenos asociados al fraguado. Además, carece de un tratamiento matemático enfocado a mitigar el problema de dependencia de la malla; sin embargo, existe la posibilidad de utilizar el lenguaje de programación propio de este programa (FISH[1]) para introducir las leyes necesarias que consideren dicha evolución y para proveer al modelo de una metodología simple que mitigue la dependencia del mallado.

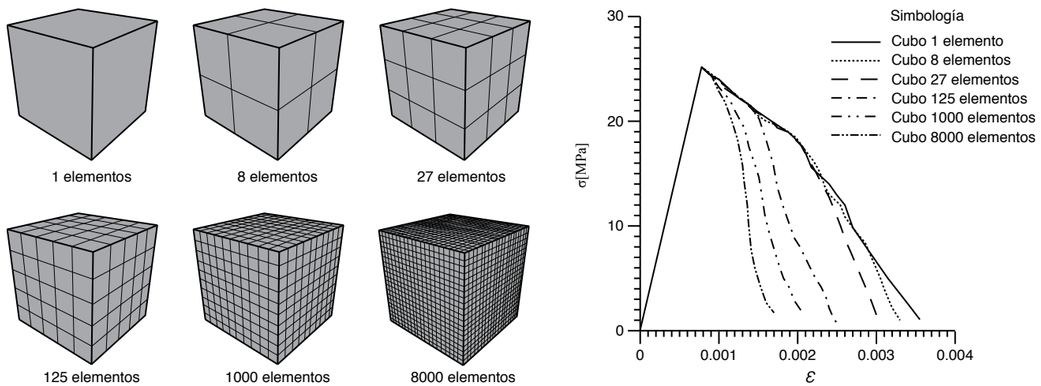


▲ Figura 1. Representación del criterio de rotura. Tomado de Schädlich et al. (2014).

3. Problemática en la modelización de estructuras a partir de sólidos de medio continuo

El concreto lanzado reforzado con fibras de acero es un material de naturaleza cuasi-frágil que al ser sometido a niveles considerables de deformación experimenta el llamado fenómeno de localización, el cual se manifiesta en delgadas bandas de intenso flujo cortante conocidas como bandas de corte (*shear bands*).

En la modelización de un problema de contorno, la presencia de las bandas de corte ocasiona que determinados campos cinemáticos lleguen a ser discontinuos, por tanto, los programas de cálculo geotécnico, al estar formulados en el marco de la mecánica del medio continuo, arrojan soluciones numéricas que muestran una importante dependencia al grado de refinamiento de la malla, obligando a utilizar discretizaciones muy finas que implican un gran costo computacional y de tiempo, resultando impráctico en muchas ocasiones. A esto se le conoce como problema de dependencia de la malla.



▲ Figura 2. Mallas de diferencias finitas utilizadas para la modelización de una muestra cúbica sometida a compresión uniaxial y curvas esfuerzo-deformación de las distintas mallas modelizadas.

Para comprender el problema previamente mencionado, se modelizó un ensayo de compresión simple sobre una muestra cúbica de concreto lanzado reforzado con fibras de acero. La Figura 2 muestra las seis mallas utilizadas y los resultados obtenidos; se observa en los resultados que antes de alcanzar la resistencia pico todas las gráficas son iguales, sin embargo, pese a que los seis modelos fueron alimentados con los mismos parámetros mecánicos, inmediatamente después de este punto se manifiesta la dependencia de la malla y todas las mallas arrojan curvas de reblandecimiento distintas, siendo más realistas los resultados proporcionados por la malla más refinada.

Con la finalidad de utilizar mallas menos densas que consuman un tiempo de cálculo menor y que proporcionen resultados confiables, en este trabajo se presentan expresiones matemáticas que pueden dar una solución práctica al problema de dependencia de la malla.

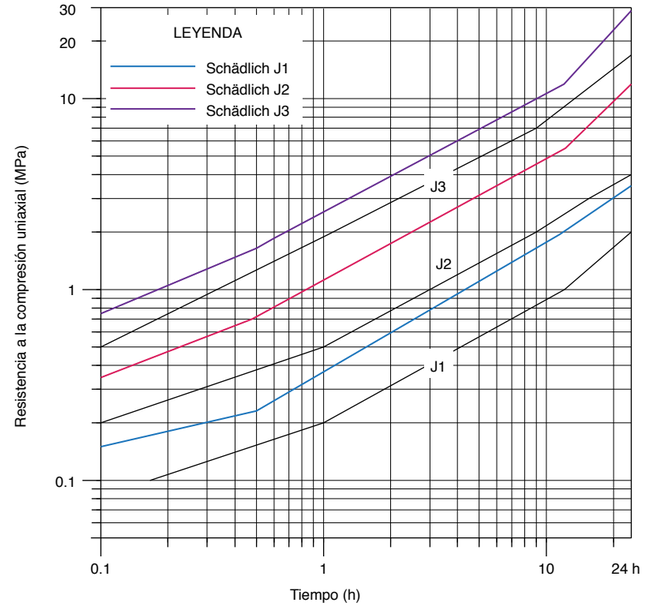
4. Estudio realizado

El trabajo formó parte de la revisión de los aspectos geotécnicos y constructivos de la excavación de un tramo de túnel localizado en la zona poniente de la Ciudad de México, con el objetivo de determinar las condiciones de seguridad de la excavación de acuerdo con algunas propuestas de mejora en los procedimientos constructivos y los sistemas de sostenimiento del proyecto original, hechas por la contratista. Una de las propuestas más importantes fue la sustitución de la doble malla electro soldada en el sostenimiento de concreto lanzado (especificada en el proyecto), por una mezcla de concreto reforzado con fibras de acero de un tipo y características tales que cumpliera con las especificaciones comunes que se emplean en obras subterráneas.

El concreto lanzado en el proyecto tenía una especificación de resistencia a los 28 días de f'_c=250 kg/cm^2 con un refuerzo de dos lechos de malla electrosoldada 6×6-04/04, es decir, con separación de 150 mm entre alambres y diámetro de 5.72 mm.

Para justificar este cambio en el proyecto, se llevaron a cabo análisis tensodeformacionales en dos y tres dimensiones, empleando la ley constitutiva *Shotcrete Model,* la cual se adapta muy bien al comportamiento exhibido por este tipo de mezclas, tomando en cuenta el proceso de endurecimiento en el tiempo (mismo que se ajusta al proceso constructivo simulado en el modelo), así como varias de las particularidades de las relaciones esfuerzo-deformación del concreto lanzado.

Posteriormente, se aprovecharon estas modelizaciones para determinar si la ley constitutiva *Strain Hardening/Softening Mohr-Coulomb* de FLAC^{3D} era capaz, a partir de ciertas adaptaciones, de representar de manera realista el comportamiento del concreto lanzado reforzado con fibras de acero. Dichas adaptaciones se lograron mediante la calibración de la respuesta del material ante distintas solicitaciones mecánicas utilizando expresiones matemáticas que, además de describir adecuadamente el comportamiento del CLRFA, mitigan el problema de dependencia de la malla.



Tiempo (hr)	J1	J2	J3
<0.1	0.15	0.350	0.75
0.5	0.23	0.715	1.65
12	2.00	5.500	12.00
24	3.50	12.000	28.50

▲ Figura 3. Evolución de la resistencia de los concretos lanzados tipo J1, J2 y J3 durante las primeras 24 horas según la Norma EN 14487 (2006) y valores adoptados por el modelo SM.

4.1. Parámetros tiempo-dependientes

4.1.1. Módulo de elasticidad

El incremento en el tiempo del módulo de Young en el Shotcrete Model y el que fue programado para el Strain Hardening/Softening Mohr Coulomb Model sigue las recomendaciones de la norma europea CEB-FIP Model Code (2010).

[1] Lenguaje de programación desarrollado por Itasca Consulting Group, Inc.

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t) E_{ci} \qquad (1)$$

donde:

$$\beta_E(t) = \left[\beta_{cc}(t)\right]^{0.5}$$

y, a su vez

$$\beta_E(t) = \exp\left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\}$$

donde:

- $E_{ci}(t)$ – Módulo de elasticidad, en MPa, a una edad t, en días.
- E_{ci} – Módulo de elasticidad a los 28 días, en MPa.
- $\beta_E(t)$ – Coeficiente que depende de la edad del concreto, t en días.
- $\beta_{cc}(t)$ – Función que describe la evolución de la resistencia del concreto en el tiempo.
- $\beta_{cc}(t)$ – coeficiente que depende de la clase de cemento (s=0.38 para ganancia de resistencia normal, s=0.25 para ganancia rápida y s=0.20 para ganancia más rápida)

4.1.2. Resistencia a compresión simple

Para calcular la evolución de la resistencia a compresión f_c con el tiempo, el *Shotcrete Model* emplea la misma aproximación que el CEB-FIP Model Code-2010 con un límite inferior de $f_c = 0.005 \times f_{c,28}$, el cual es usado en edades muy tempranas. Alternativamente, la evolución de la resistencia puede simularse de acuerdo a las resistencias tempranas de las clases de concreto lanzado J_1, J_2 y J_3 de la norma EN 14487, 2006.

Por otro lado, la capacidad del concreto lanzado para soportar grandes deformaciones no es sólo el resultado del bajo módulo de elasticidad en edades tempranas, sino también consecuencia de su gran ductilidad plástica: a medida que éste envejece, la ductilidad decrece. En el modelo SM, este comportamiento es representado por una deformación plástica pico tiempo dependiente, ε^p_{cp}. Mediante una aproximación similar a la propuesta por Meschke (1996), se adopta una función tri-lineal en el tiempo. Los parámetros introducidos son las deformaciones plásticas pico para t =1h, 8h, 24h. A partir de las 24 horas, se asume que ε^p_{cp} es constante.

La evolución de la resistencia a partir de las primeras 24 horas se calcula como:

$$f_c(t) = f_{c,28} \cdot \left(f_{c,1} / f_{c,28} \right) \frac{t_{hydr} - t}{(t_{hydr} - 1d) \cdot t} \qquad (2)$$

donde $f_{c,28}$ es la resistencia a los 28 días, $f_{c,1}$, la resistencia en un día, t el tiempo y t_{hydr} el tiempo de hidratación que usualmente es igual a 28 días.

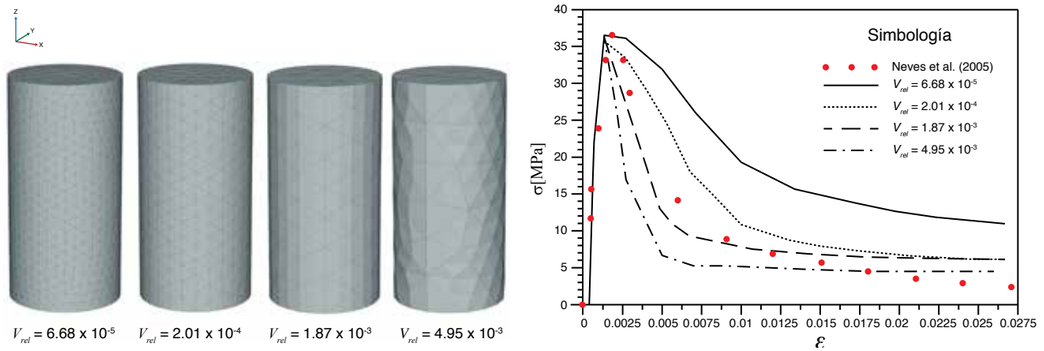
Por su parte, al modelo *Strain Hardening/Softening Mohr Coulomb* se le programó la ley de evolución de la resistencia a compresión simple propuesta por Sánchez (2016), la cual consiste en expresiones matemáticas que permiten calcular la variación de los parámetros de resistencia del criterio Mohr-Coulomb [$c_c(t)$, $\phi_c(t)$] en el tiempo y, a partir de ello, calcular la evolución que sufre la resistencia a compresión simple del material:

$$f_t = \frac{t\, t_{hydr}}{t_{hydr}(a+t) - at} \qquad (3)$$

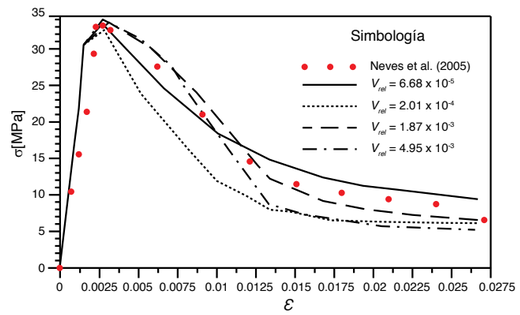
$$\tan\phi^* = \frac{f_t \dfrac{\sin\phi^{peak}}{1 - \sin\phi^{peak}}}{\sqrt{1 + 2 f_t \dfrac{\sin^{peak}}{1 - \sin\phi^{peak}}}}$$

$$c^* = \frac{f_t \times f_c^*}{2} \left[\cos\phi^* - \frac{\tan\phi^*}{1 + f_t \dfrac{\sin\phi^{peak}}{1 - \sin\phi^{peak}}} \right] = c^{peak} \frac{\tan\phi^*}{\tan\phi^{peak}}$$

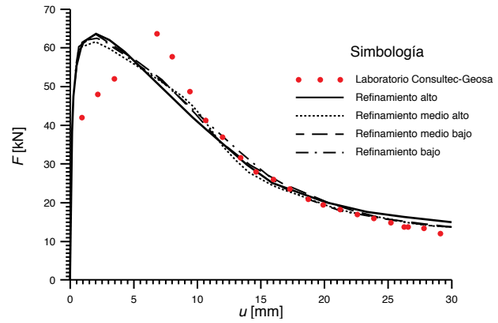
donde t es el tiempo en días; t_{hydr} es el tiempo de hidratación total del concreto (28 días); a es un parámetro que controla la velocidad de endurecimiento y cuyos valores varían según la clase de concreto: a=1.9 para concretos con ganancia de resistencia muy rápida, a=2.5 para los de ganancia rápida y a=4.5 para los de ganancia lenta; f_t es el factor de resistencia en función del tiempo; c^{peak} y ϕ^{peak} son la cohesión y la fricción del concreto



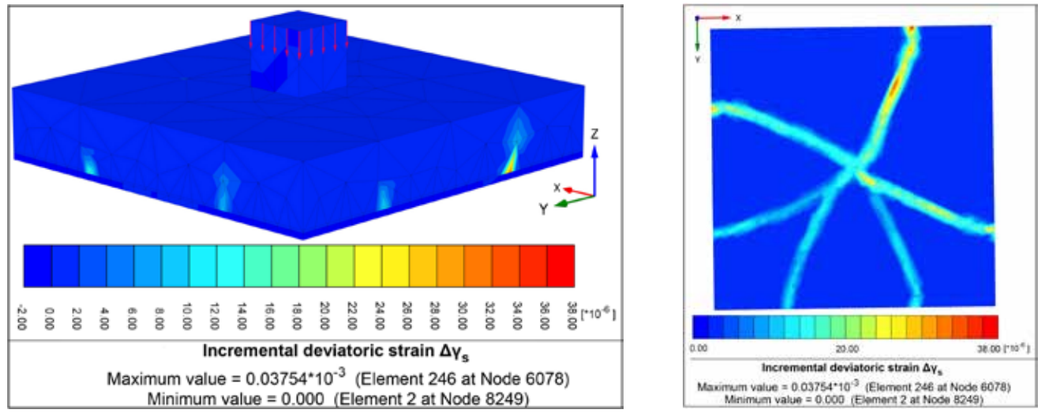
▲ Figura 4. Existencia del problema de dependencia de la malla al utilizar el *Shotcrete Model*.



▲ Figura 5. Curva esfuerzo-deformación correspondiente a una probeta reforzada con 1.13% de fibras utilizando la expresión matemática (5).



▲ Figura 6. Curva fuerza-deflexión correspondiente al ensayo de capacidad de absorción de energía.



▲ Figura 7. Contornos de deformación incremental de corte de la prueba de capacidad de absorción de energía en panel.

a los 28 días, respectivamente. Si se desconoce el valor de los parámetros de resistencia, puede asumirse que $37° \leq \phi^{peak} \leq 39°$ y con la expresión siguiente calcular la cohesión pico:

$$c^{peak} = \frac{f_c^* (1 - \sin\phi^{peak})}{2 \cos\phi^{peak}} \qquad (4)$$

donde f^*_c es la resistencia a compresión simple a los 28 días afectada por un factor de reducción ($0.8 f^*_c$).

4.2. Metodología para mitigar el problema de dependencia de la malla

4.2.1. Metodología empleada en elementos finitos

Como se menciona anteriormente, el *Shotcrete Model* de Plaxis cuenta con una teoría regularizadora conocida como *Smeared Crack* para mitigar el problema de dependencia de la malla; sin embargo, al llevar a cabo una serie de cálculos en mallas con distintos grados de refinamiento pudo observarse que dicho tratamiento en el modelo no proporciona resultados satisfactorios, es decir, prevalece el problema de dependencia de la malla (Figura 4).

En la Figura 4 puede observarse también que para esta prueba, a mayor grado de refinamiento, las curvas de *softening* son menos acusadas y viceversa, cuando por lo general debería suceder lo contrario.

Para mitigar el problema, se utilizó la metodología propuesta en García (2017), la cual consiste en utilizar expresiones matemáticas que permiten calcular los parámetros que resultan ser dependientes del grado de refinamiento en función del llamado volumen relativo (V_{rel}).

El volumen relativo se calcula como el cociente entre el volumen promedio de los elementos que componen la malla y el volumen total de la misma, por ende, este valor resulta ser un indicador del grado de refinamiento: entre menor sea el valor de volumen relativo, mayor será el grado de refinamiento de la malla.

a) Ensayo de compresión simple

A continuación se presentan las expresiones matemáticas que permiten mitigar el problema de dependencia de la malla al modelizar una probeta de concreto lanzado reforzada con 1.13% de fibras de acero (27.12 kg/m^3). Dichas expresiones calculan la energía de fractura en compresión (G_c) la cual representa el área bajo la curva esfuerzo-deformación del elemento y puede definirse como la cantidad de energía necesaria para producir

▲ Figura 8. Vistas del panel al final de la prueba.

una unidad de área de fisura continua; lo anterior permite explicar por qué se calcula dicha energía para modificar la rama de *softening* del material.

Por otro lado, la Figura 5 presenta los resultados obtenidos mediante dicha metodología comparándolos con los resultados publicados por Neves y De Almeida (2005). Nótese que, comparada con la gran dependencia que muestran los experimentos de la Figura 4 se alcanza a mitigar un poco el problema.

$$G_c = G_{c_r} - (G_{c_r} - G_{c_0})\, e^{-\frac{V_{rel}}{b}} \qquad (5)$$

donde:

G_{c_r} – valor último de la curva, G_c-V_{rel} (en este caso G_{c_r}=9.5)
G_{c_0} – valor inicial de la curva, G_c-V_{rel} (en este caso G_{c_0}=1.0)
b – parámetro de ajuste (en este caso b = 0.002)

b) Prueba de capacidad de absorción de energía (tenacidad)

En el caso de la prueba de panel cuadrado, EFNARC[2] 14488-5:2006, se presentan dos expresiones matemáticas para mitigar el problema, pues los parámetros que resultaron ser dependientes del grado de refinamiento de la malla son la energía de fractura en tensión, G_t y la resistencia a tensión a los 28 días, t_{28}.

$$G_t = 133387\,(V_{rel})^2 - 35.27(V_{rel}) + 1.07 \qquad (6)$$

$$f_{t,28} = 82367\,(V_{rel}) + 1311.4 \qquad (7)$$

La Figura 6 muestra los resultados finales obtenidos de las simulaciones una vez que se utilizan las expresiones (6) y (7) comparándolos con ensayos reales de laboratorio; en ellos puede verse que el problema de dependencia de la malla ha sido eliminado casi por completo.

La Figura 7 muestra los contornos de igual magnitud de deformación desviadora incremental (*incremental deviatoric shear strain*) generados en el panel una vez finalizada la prueba; del lado izquierdo se observan las bandas de corte generadas en el espesor del panel y del lado derecho, las que se forman en la parte inferior del mismo. Nótese la semejanza que guarda con un panel real ensayado en el laboratorio (Figura 8).

c) Ensayo de flexión de tres puntos en panel cuadrado con muesca

En 2011, la EFNARC publicó el ensayo ENC 371 FTC V1.1_18-06-11, que hace uso de un panel con las mismas dimensiones del panel de absorción de energía, pero cuenta con una muesca en la parte inferior cuyas dimensiones son 5 mm de ancho por 10 mm de altura.

El panel está biapoyado en cilindros de acero localizados a 5 cm de cada borde y que pueden girar libremente sobre sus ejes. La carga es transmitida por otro cilindro colocado en la parte central superior del panel; de esta manera, el panel es sometido a flexión y, por lo tanto, experimenta tensión en la parte inferior.

En este caso, los parámetros que mostraron dependencia al grado de refinamiento de la malla fueron la resistencia residual última (f_{tun}) y la resistencia a tensión a los 28 días ($f_{t,28}$), por lo tanto, fueron propuestas las siguientes expresiones matemáticas:

$$f_{t,28} = 7.251\text{x}10^9\,(V_{rel})^2 - 4.294\text{x}10^6\,(V_{rel}) + 2013 \qquad (8)$$

$$f_{tun} = -4.452\text{x}10^6\,(V_{rel})^2 + 1515(V_{rel}) + 0.09 \qquad (9)$$

[2] European Federation of National Associations Representing for Concrete

Refinamiento	Bajo	Medio-bajo	Medio-alto	Alto	Ensayo de Rivaz (2011)
$f_{R,1}$ [N/mm^2]	26.8	30.3	30.1	30.5	25.0
$f_{R,2}$ [N/mm^2]	21.7	28.	24.7	24.7	23.4
$f_{R,3}$ [N/mm^2]	21.0	21.6	21.6	21.2	21.0
$f_{R,4}$ [N/mm^2]	19.7	19.2	18.7	18.3	18.5
LOP [N/mm^2]	12.4	12.4	12.4	12.4	29.2

▲ Tabla 1. Esfuerzos residuales y límite de proporcionalidad de cada una de las mallas y del ensayo publicado por de Rivaz (2011).

La Figura 9 muestra las curvas resultantes al utilizar las expresiones de ajuste desarrolladas por García (2017) y las compara con resultados de pruebas reales publicadas por de Rivaz (2011). Asimismo, presenta el mecanismo de falla que presenta el panel al final del ensayo. Por otro lado, la Tabla 1 presenta los resultados de resistencias residuales obtenidas de la simulación y las presentadas por de Rivaz (2011). Nótese que los resultados son considerablemente buenos.

d) Ensayo de tensión directa

En este caso, los parámetros dependientes al refinamiento de la malla son la energía de fractura en tensión (G_t) y la resistencia residual última (f_{tun}) y las expresiones a utilizar se muestran a continuación:

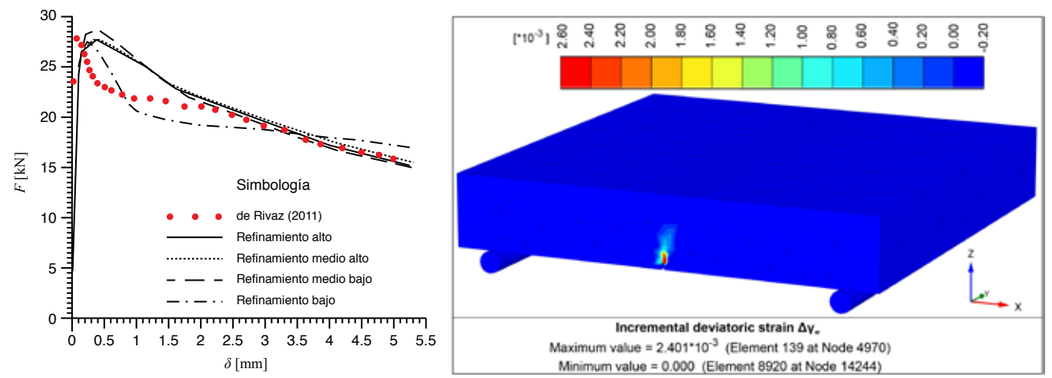
$$G_t = 172442(V_{rel})^2 + 540.64V_{rel} + 3.3502 \qquad (10)$$

$$f_{tun} = -6923.9\,(V_{rel})^2 + 53.654V_{rel} - 0.005 \qquad (11)$$

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos de una de las series de simulaciones realizadas y los compara con resultados de pruebas reales publicados en Carnovale (2013) para probetas reforzadas con 1% de fibras metálicas (DC-P2). Estos resultados ya incluyen el tratamiento matemático para disminuir la dependencia de la malla.

4.2.2. Metodología empleada en diferencias finitas

Como se menciona anteriormente, el modelo utilizado en el programa de Diferencias Finitas es el *Strain Hardening/Softening Mohr Coulomb Model,* el cual no cuenta con un tratamiento matemático que permita eliminar el problema de dependencia de la malla. En García (2017) se presenta una metodología práctica para lograr este fin; ésta consiste en programar determinadas expresiones matemáticas que describen la evolución de los parámetros dependientes del refinamiento del mallado en función de una relación de evolución de la resistencia (χ) y del volumen relativo propio de la malla a utilizar (V_{rel}).



▲ Figura 9. Comparativa entre curvas carga-deflexión obtenidas de las simulaciones y contornos de igual magnitud de deformación de corte.

Cabe mencionar que cada solicitación mecánica tiene un conjunto de expresiones propias que le permiten describir adecuadamente el comportamiento del concreto lanzado reforzado con fibras, tanto en la rama pico como en la post-pico, a la par que mitiga razonablemente el problema de dependencia de la malla.

La variable interna del programa de diferencias finitas que gobierna la evolución de los parámetros resistentes del modelo, $\Delta\kappa^s$, es una medida del segundo invariante del tensor de deformaciones plásticas:

$$\Delta\kappa^s = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\Delta\varepsilon_1^{Ps}-\Delta\varepsilon_m^{Ps})^2+(\Delta\varepsilon_m^{Ps})^2+(\Delta\varepsilon_3^{Ps}-\Delta\varepsilon_m^{Ps})^2} \qquad (12)$$

donde:

$\Delta\varepsilon_1^{Ps}$ – *Incremento de deformación principal mayor plástica*
$\Delta\varepsilon_3^{Ps}$ – *Incremento de deformación principal menor plástica*
$\Delta\varepsilon_m^{Ps}$ – *Incremento de deformación plástica volumétrica de corte*

$$\Delta\varepsilon_m^{Ps} = \frac{1}{3}(\Delta\varepsilon_1^{Ps}-\Delta\varepsilon_3^{Ps}) \qquad (13)$$

Obteniendo el valor de $\Delta\kappa^s$ en cada una de las etapas de cálculo, es posible establecer una relación con la evolución de los parámetros del criterio de Mohr-Coulomb y, de este modo, establecerla como una función.

a) Ensayo de compresión simple

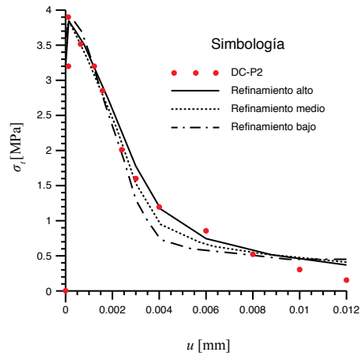
En el caso de compresión simple, los parámetros Mohr-Coulomb que rigen el comportamiento del material son la cohesión y la fricción interna; las expresiones que describen su evolución son función de valores iniciales (0), residuales (r) y pico ($peak$). Las ecuaciones (14) y (15), muestran la evolución de dichos parámetros.

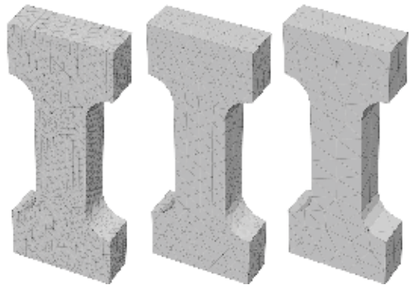
$$c = \left[c_r + (c_0 - c_r)\, e^{-\left[\frac{\Delta\kappa^t}{\chi}\right]} \right] c^{peak}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\left[\phi_r + (\phi_0 - \phi_r)\, e^{-\left[\frac{\Delta\kappa^t}{\chi}\right]} \right]\tan\phi^{peak}\right] \qquad (14)$$

$$\chi = \chi_{ult} + (\chi_0 - \chi_{ult})\, e^{-\left[\frac{V_{rel}}{b}\right]} \qquad (15)$$

Donde c es la cohesión; c^{peak}, la cohesión pico; c_r y c_0, la cohesión residual e inicial de la curva de *softening* normalizada, respectivamente; ϕ, el ángulo de fricción interna; ϕ^{peak}, el ángulo de fricción interna pico; ϕ_r y ϕ_0, el ángulo de fricción residual e inicial de la curva de *softening* normalizada, respectivamente; χ, la relación de evolución de la resistencia; χ_{ult}, y χ_0, el valor residual e inicial de la curva χ- V_{rel}, respectivamente; b, un parámetro de ajuste.





a) Refinamiento alto b) Refinamiento medio c) Refinamiento bajo

▲ Figura 10. Curva esfuerzo-desplazamiento del ensayo de tensión directa y mallas utilizadas para la simulación.

Para el caso de una probeta reforzada con 1.13% de fibras de acero, el tratamiento matemático dio como resultado la Figura 11, en ella se observan las curvas correspondientes a mallas con distintos grados de refinamiento comparadas con los resultados publicados por Neves y De Almeida (2005) y se muestra un ejemplo del mecanismo de falla de la probeta.

b) Prueba de capacidad de absorción de energía (tenacidad)

En esta prueba, el parámetro que rige el comportamiento del panel es la resistencia a la tensión; sin embargo, a diferencia del ensayo anterior, la ley de evolución que se propone es de tipo lineal. Los resultados que ésta proporciona son bastante adecuados, pues al compararlos con pruebas reales de laboratorio se observa gran proximidad entre ellos (Figura 12). Asimismo, se observa que el mecanismo de falla es muy similar al que se presenta en paneles reales:

$$\sigma_t = \sigma_t^{peak} + m\Delta\kappa^t \qquad (16)$$

$$m = m_0 - (m_0 - m_r)e^{-\left(\frac{v_{cm}}{b}\right)} \qquad (17)$$

c) Ensayo de flexión de tres puntos en panel cuadrado con muesca

La ley propuesta para describir la evolución de la resistencia a tensión durante la ejecución de este ensayo corresponde a una función discontinua con dos intervalos. Los resultados proporcionados se muestran en la Figura 13 donde, además, se comparan con resultados publicados por de Rivaz (2011); nótese la proximidad entre los resultados:

$$\sigma_t = \begin{cases} \left[\sigma_r^t + (\sigma_0^t - \sigma_r^t)\, e^{-\left[\frac{\Delta\kappa^t}{\chi_1}\right]}\right]\sigma_t^{peak} & \text{para } \Delta\kappa^t \le 0.05 \\ \left[\sigma_r^t - (\sigma_0^t - \sigma_r^t)\, e^{-\left[\frac{\Delta\kappa^t}{\chi_2}\right]}\right]\sigma_t^{peak} & \text{para } \Delta\kappa^t > 0.05 \end{cases} \qquad (18)$$

$$\chi_1 = \chi_1^{ult} + (\chi_1^0 - \chi_1^{ult})e^{-\left(\frac{v_{cm}}{b_1}\right)} \qquad (19)$$

$$\chi_2 = \chi_2^{ult} + (\chi_2^0 - \chi_2^{ult})e^{-\left(\frac{v_{cm}}{b_2}\right)} \qquad (20)$$

donde σ_t es la resistencia a tensión; σ^t_r y σ^t_0, los valores residual e inicial de la curva de *softening* normalizada, respectivamente; χ_1^{ult}, y χ_1^0, los valores residual e inicial de la curva χ-V_{rel} correspondiente a la primera rama de la ecuación (18); χ_2^{ult}, y χ_2^0, los valores residual e inicial de la curva χ-V_{rel} correspondiente a la segunda rama de la ecuación (18); b_1 y b_2, parámetros de ajuste.

La Figura 14 muestra la malla deformada y los contornos de deformación incremental de corte al final de la prueba para la malla más fina.

La Tabla 2 presenta el límite de proporcionalidad y los esfuerzos residuales calculados a partir de las curvas; es clara la cercanía que existe entre los resultados de las simulaciones y las pruebas reales.

a) Ensayo de tensión directa

Durante la ejecución del ensayo de tensión directa, el parámetro que rige el comportamiento del espécimen es la resistencia a la tensión (σt), por lo tanto, las expresiones matemáticas desarrolladas permiten conocer la evolución de ésta.

$$\sigma_t = \left[\sigma_{tr} + (\sigma_{t0} - \sigma_{tr})\, e^{-\left[\frac{\Delta\kappa^t}{\chi}\right]}\right]\sigma_t^{peak} \qquad (21)$$

$$\chi = \chi_{ult} + (\chi_0 - \chi_{ult})\, e^{-\left(\frac{v_{cm}}{b}\right)} \qquad (22)$$

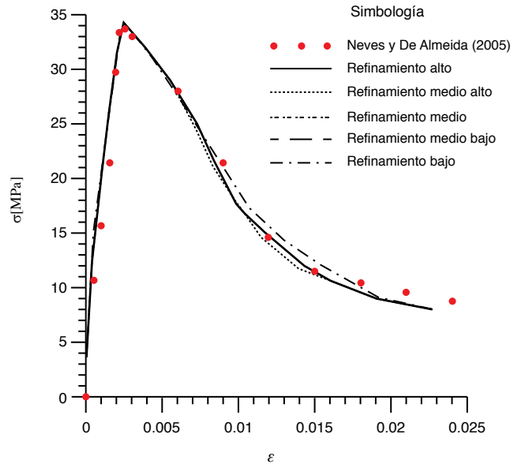
La Figura 15 muestra el desempeño de dichas expresiones para probetas reforzadas con 1.0% (DC-P2) y 1.5% (C1F1V3) de fibras de acero comparándolas con resultados publicados en Carnovale (2013), y la Figura 16 compara el mecanismo de falla real con el de las simulaciones.

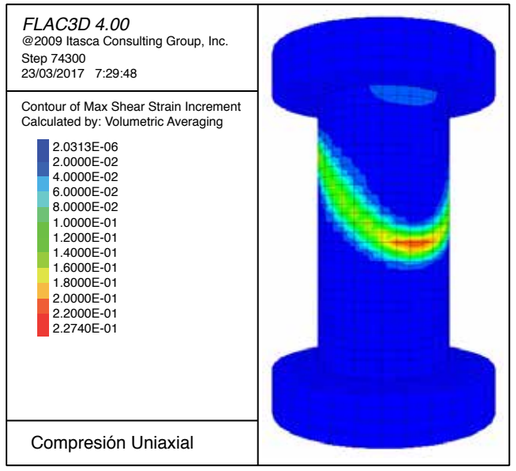
4.3. Modelización de un tramo de túnel en la zona poniente de la Ciudad de México

En los modelos que a continuación se presentan, fueron introducidas las leyes de evolución de rigidez y resistencia anteriormente presentadas, así como las de endurecimiento-reblandecimiento afectadas por los tratamientos matemáticos que permiten mitigar los efectos de la dependencia de la malla.

4.3.1. Modelización mediante la técnica de elementos finitos

Esta parte del estudio consistió en la revisión de los aspectos geotécnicos y constructivos de la excavación de un tramo de metro en la Ciudad de México, con el fin de verificar las condiciones de seguridad ante los cambios en procedimientos

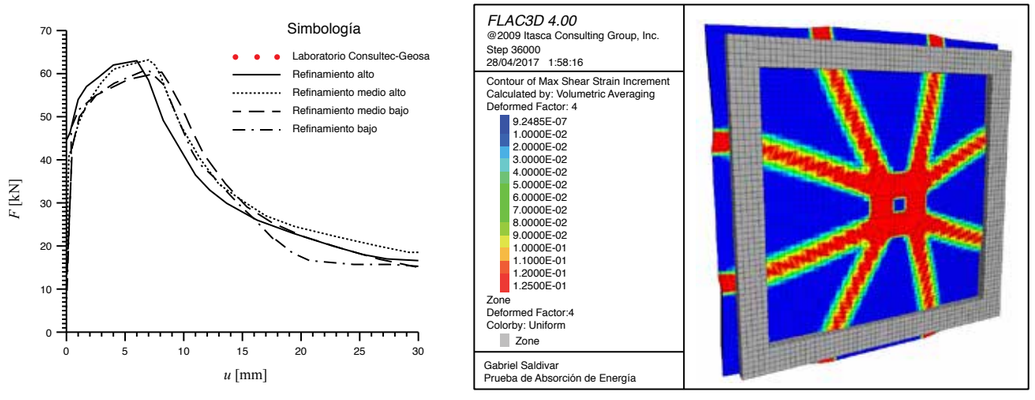


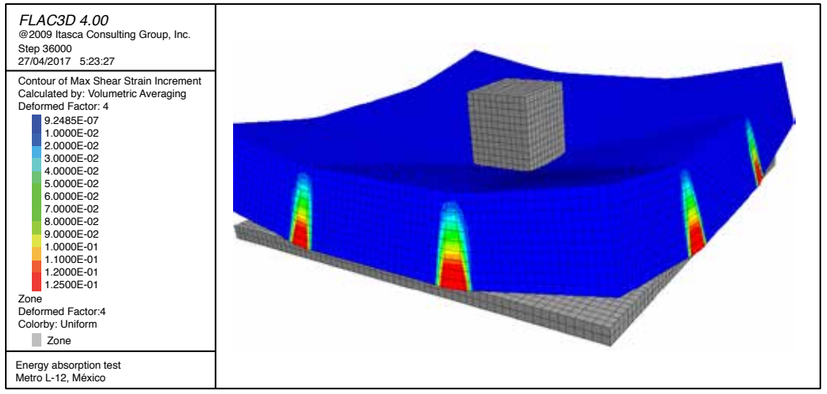


▲ Figura 11. Curva esfuerzo-deformación del ensayo de compresión simple después de utilizar el tratamiento matemático para mitigar el problema de dependencia de la malla y localización de bandas de cortante.

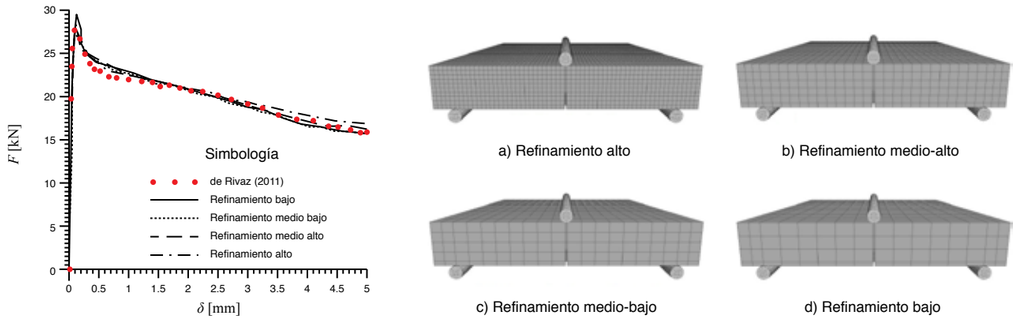
Refinamiento	Bajo	Medio-bajo	Medio-alto	Alto	Ensayo de Rivaz (2011)
$f_{R,1}$ [N/mm²]	26.3	26.0	26.4	25.9	25.0
$f_{R,2}$ [N/mm²]	23.5	23.2	23.3	23.5	23.4
$f_{R,3}$ [N/mm²]	20.7	20.4	20.9	21.4	21.0
$f_{R,4}$ [N/mm²]	17.9	17.9	18.6	19.3	18.5
LOP [N/mm²]	26.4	25.8	25.0	24.2	29.2

◄ Tabla 2. Esfuerzos residuales y límite de proporcionalidad de cada una de las mallas modelizadas y del ensayo real publicado por de Rivaz (2011).

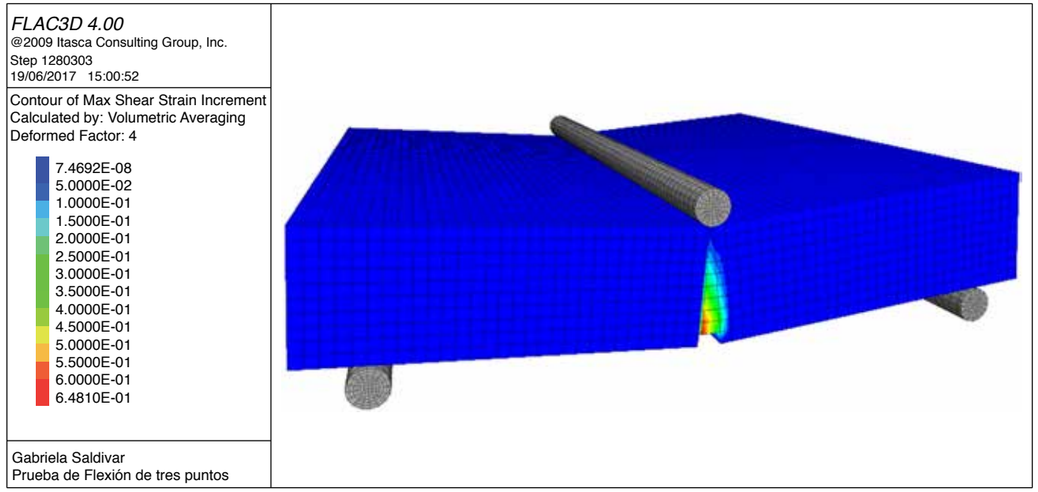




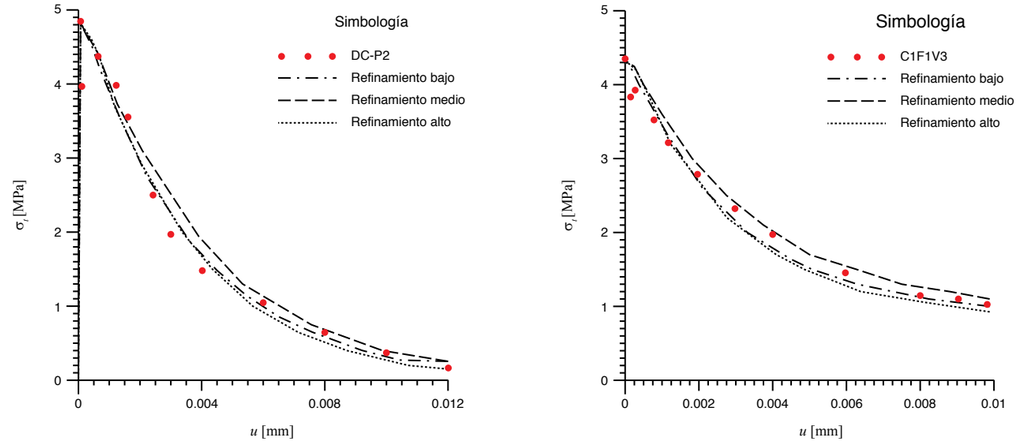
◄ Figura 12. Curva esfuerzo-deformación del ensayo de capacidad de absorción de energía después de utilizar el tratamiento matemático para mitigar el problema de dependencia de la malla y mecanismos de falla.



▲ Figura 13. Comparación entre la curva fuerza-deflexión de de Rivaz (2011) y las obtenidas a partir de las simulaciones y distintas mallas empleadas.



▲ Figura 14. Contornos de deformación incremental de corte al final de la prueba.



▲ Figura 15. Curva esfuerzo-desplazamiento del ensayo de tensión directa después de utilizar el tratamiento matemático para mitigar el problema de dependencia de la malla.

constructivos y de sostenimiento que se iban generando durante la construcción. La modelización numérica tomó en cuenta la campaña de seguimiento geotécnico e instrumentación, implementando retro análisis para aproximarse al comportamiento real.

Se llevaron a cabo modelizaciones con el programa de elementos finitos Plaxis 3D y otras con Plaxis 2D, con la finalidad de agilizar los cálculos; es decir, pese a que la malla tridimensional construida para este análisis es sencilla (Figura 17-izquierda), un cálculo completo puede llegar a tardar varios días, mientras que una malla bidimensional bien calibrada permite obtener resultados razonables en tan sólo minutos. El modelo bidimensional coincide con una de las secciones de instrumentación que forman parte del seguimiento durante la obra.

Para validar la calibración en dos y tres dimensiones, se colocaron puntos de control con la misma posición en ambos modelos (Figura 17-derecha) para dicha sección instrumentada y se graficaron los desplazamientos, relacionándolos con el avance de las distintas etapas constructivas, la edad del concreto lanzado y con la distancia de los frentes de excavación respecto de la sección de control.

En la gráfica de la Figura 18 se presentan los resultados de medición de convergencias en la línea A-B de la estación de control con respecto a la distancia del frente de excavación. A los datos de instrumentación se les suma el acortamiento acumulado del modelo 3D para cuando el frente de la media sección superior está a 4.5 m por delante de la sección de control (distancia

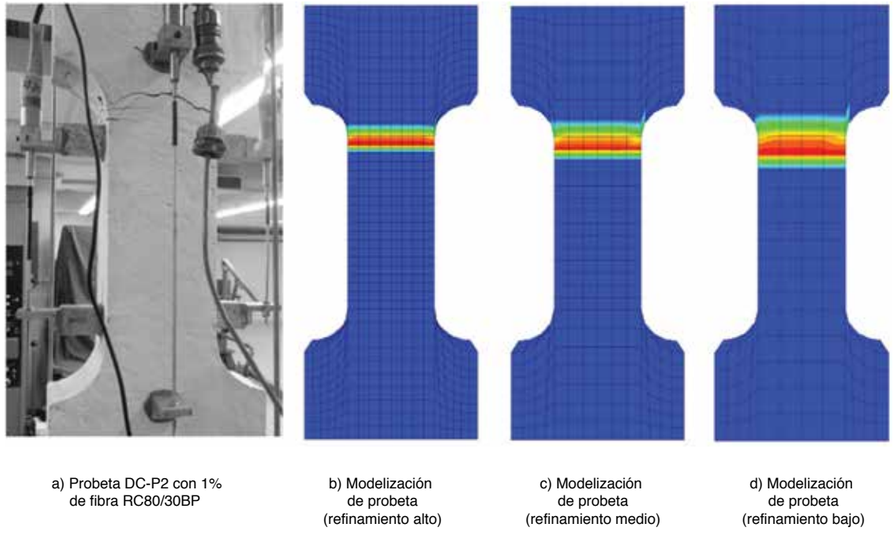
a la que estaba el frente cuando se colocaron los puntos de convergencia); así el gráfico representa la historia deformacional completa obtenida a partir de la calibración.

Una vez calibrado el modelo tridimensional, se procedió a ajustar los resultados del modelo 2D para que coincidieran entre sí (Figura 19).

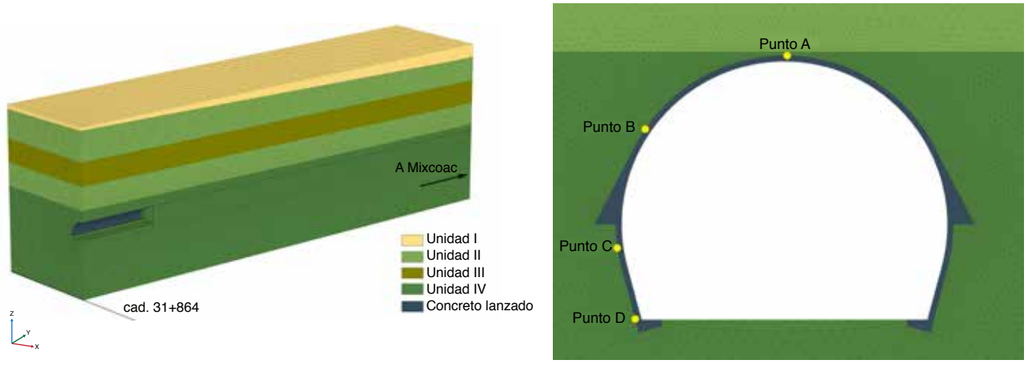
4.3.1.1. Revisión estructural del sostenimiento por flexo compresión

Una vez calibrados los modelos, se asume que los estados tensodeformacionales obtenidos representan un escenario geotécnico suficientemente realista para ser empleado en la revisión estructural. Dicha revisión se llevó a cabo a partir de los resultados de elementos mecánicos obtenidos del modelo 2D, correspondientes a la última etapa de análisis y para una edad del concreto de 28 días. Las fuerzas axiales, cortantes y momentos flexionantes se obtuvieron directamente de los elementos sólidos de medio continuo modelizados mediante la ley constitutiva de concreto lanzado (modelo SM).

A partir de los resultados de fuerzas axiales y momentos, se realizó una verificación estructural por flexo compresión, comparándolos con los respectivos diagramas de interacción para concreto lanzado reforzado con malla electro soldada y para refuerzo con fibras metálicas, este último elaborado mediante la metodología desarrollada por el comité RILEM, conocida como



▲ Figura 16. Mecanismo de falla de una probeta real [izquierda] comparado con el de las simulaciones [derecha].



▲ Figura 17. Malla 3D en una etapa de excavación con un avance del frente de 28.5 m (izquierda) y puntos de control para la calibración del modelo 2D (derecha).

método σ-ε (Vandewalle, 2003), que se basa en los resultados obtenidos de la prueba de flexión de tres puntos (Figura 20). Nótese que los resultados de elementos mecánicos caen dentro del diagrama con suficiente holgura aún cuando éste está afectado por los coeficientes de reducción de resistencia que propone el RCDF.

Una característica muy importante de este tipo de análisis es que, al tratarse de un modelo continuo elasto-plástico, por muy grandes que sean las solicitaciones estructurales, éstas pueden alcanzar el diagrama de interacción pero nunca podrán salirse, como sucede cuando se realizan análisis elásticos con elementos estructurales típicos (placas, cascarones, vigas, etc.).

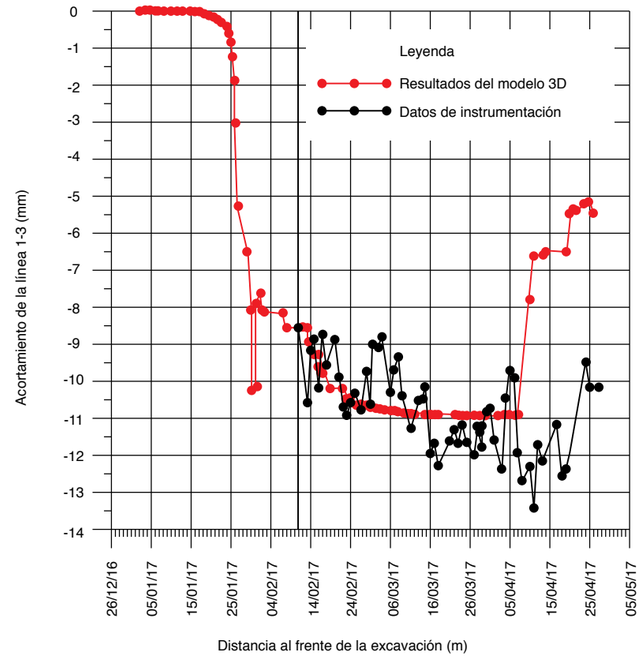
4.3.2. Modelización mediante la técnica de Diferencias Finitas

La modelización por el método de las Diferencias Finitas se llevó a cabo mediante el programa FLAC^{3D} haciendo uso del *Strain Hardening/Softening Mohr Coulomb Model*. Como se menciona anteriormente, esta ley constitutiva no es exclusiva para la modelización de estructuras de concreto lanzado, por tanto, se realizaron diversas adaptaciones al modelo mediante el uso del lenguaje FISH, entre las cuales se enlistan:

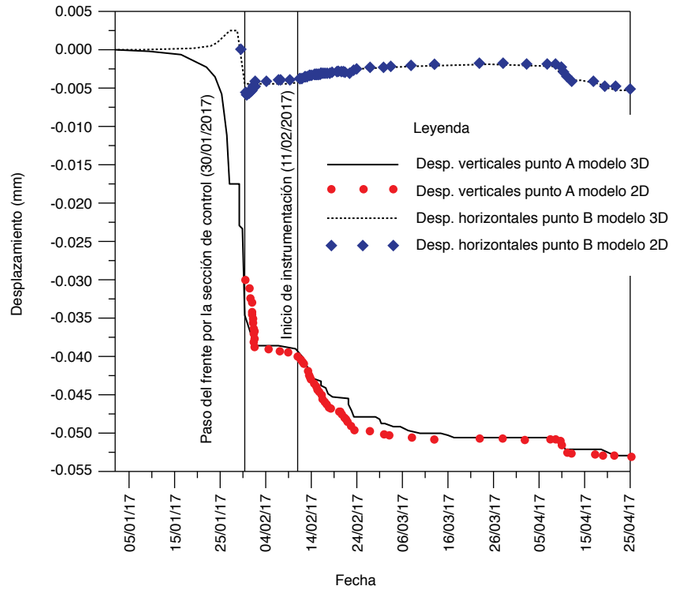
A. Introducción de una ley tiempo-dependiente para describir la evolución de la resistencia a compresión simple del concreto lanzado
B. Introducción de una ley tiempo-dependiente para describir la evolución de la resistencia a tensión del concreto lanzado
C. Introducción de una ley tiempo-dependiente para describir la evolución del módulo de elasticidad del concreto lanzado
D. Tratamiento matemático para evitar la dependencia de la malla durante la rama de *softening*

Con la finalidad de agilizar los cálculos, la malla utilizada para este análisis también representa la mitad del tramo de túnel (Figura 21).

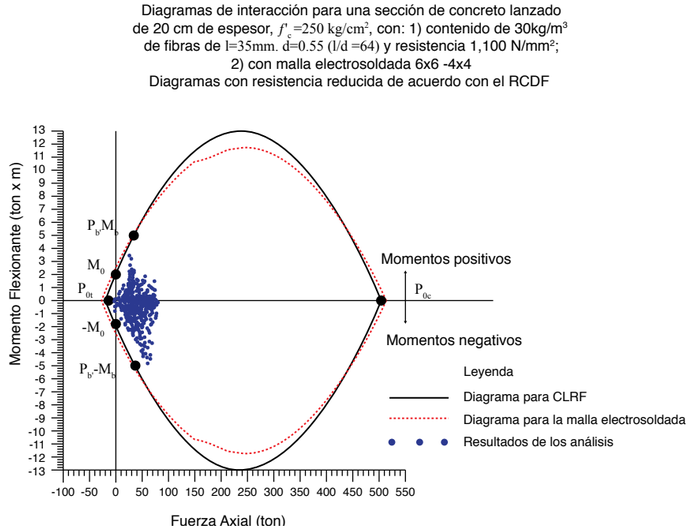
Los procesos de excavación-colocación de sostenimiento se programaron de manera tal que se aproximara lo más posible al modelo de Plaxis; lo anterior debido a que en FLAC^{3D} la rutina programada considera incrementos discretos de tiempo de un día: mientras que en el programa de elementos finitos es posible realizar incrementos de horas. Asimismo, se colocaron los mismos puntos de control



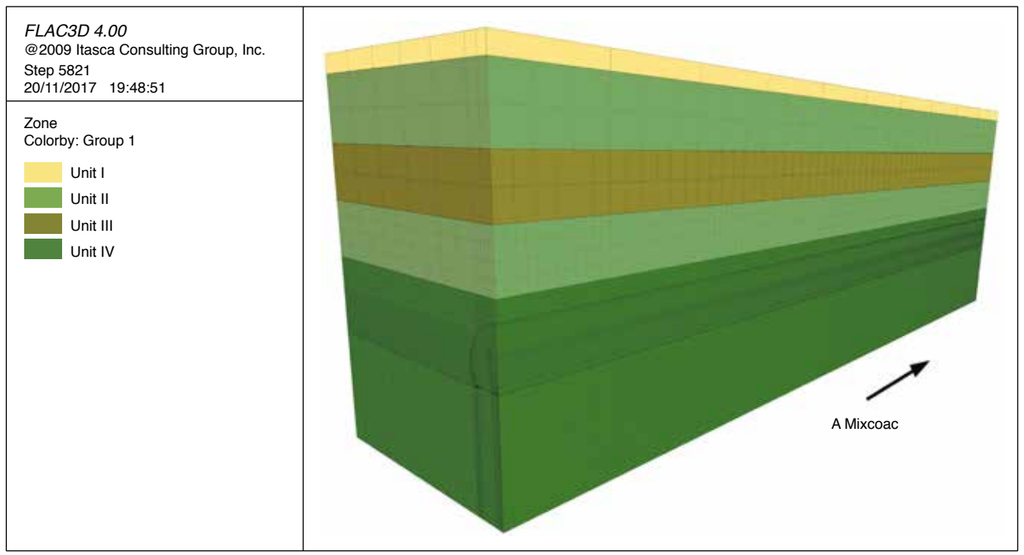
▲ Figura 18. Extrapolación de los resultados de la modelización con PLAXIS 3D, desde el inicio de la excavación hasta una distancia de 85 m del frente de excavación y posicionamiento equivalente de las mediciones de convergencias.



▲ Figura 19. Desplazamientos en los puntos de control obtenidos con el modelo 3D y su respectiva calibración en 2D.



▲ Figura 20. Diagramas de interacción y resultados de elementos mecánicos de los análisis para la sección resistente de 20 cm de concreto lanzado reforzado con a) fibras de acero; b) malla electrosoldada.



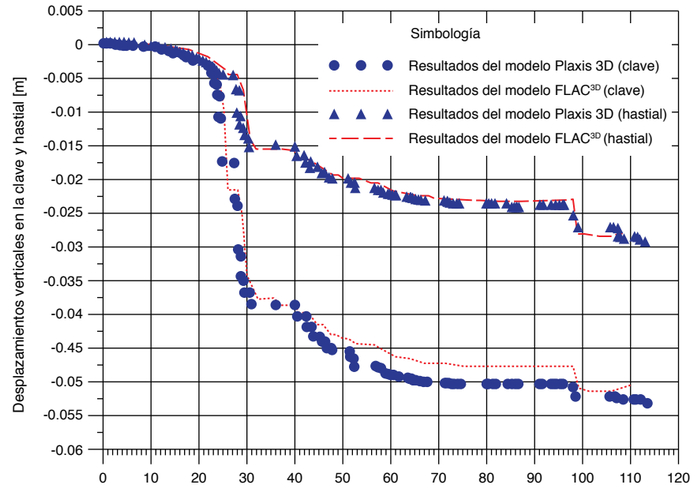
▲ Figura 21. Malla 3D para el análisis en FLAC3D.

en el cad. 31+825.45 para poder realizar la calibración entre los modelos.

La Figura 22 muestra la calibración entre los modelos Plaxis 3D (previamente calibrado con resultados de instrumentación) y FLAC3D correspondientes a los desplazamientos verticales medidos en la clave y el hastial; en ella se aprecia que tanto la magnitud como el comportamiento de los desplazamientos calculados mediante la técnica de diferencias finitas son bastante similares a los resultados obtenidos mediante elementos finitos.

Asimismo, en la Figura 23 se presenta la calibración de desplazamientos horizontales medidos en el hastial del túnel. En este caso, se observa una ligera diferencia entre los resultados de ambas técnicas a partir de los 30 días de excavación; sin embargo, considerando la escala, se aprecia que dicha diferencia es apenas de 1 mm, por lo que la calibración se considera aceptable.

Las figuras anteriores demuestran que las adaptaciones realizadas en el *Strain Hardening/Softening Mohr Coulomb Model* permiten realizar una modelización realista del comportamiento del concreto lanzado reforzado con fibras de acero, a la vez que se mitiga de manera importante el problema de dependencia de la malla que se presenta al modelizar materiales cuasi-frágiles sometidos a niveles considerables de deformación.

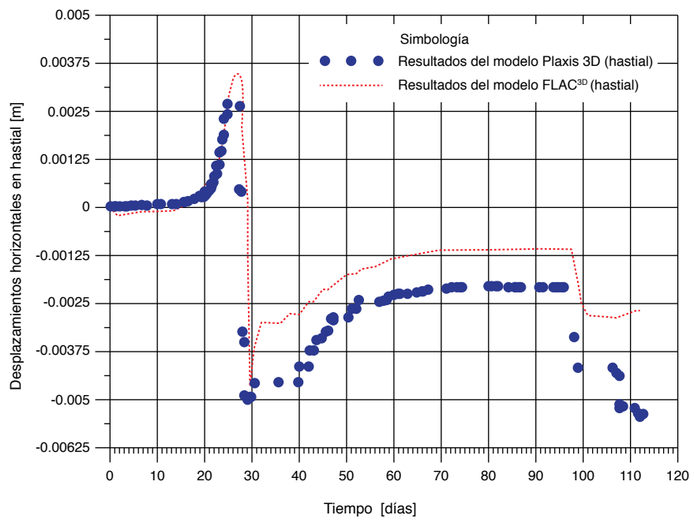


▲ Figura 22. Comparación de resultados Plaxis 3D y FLAC3D para los desplazamientos verticales en clave y hastiales.

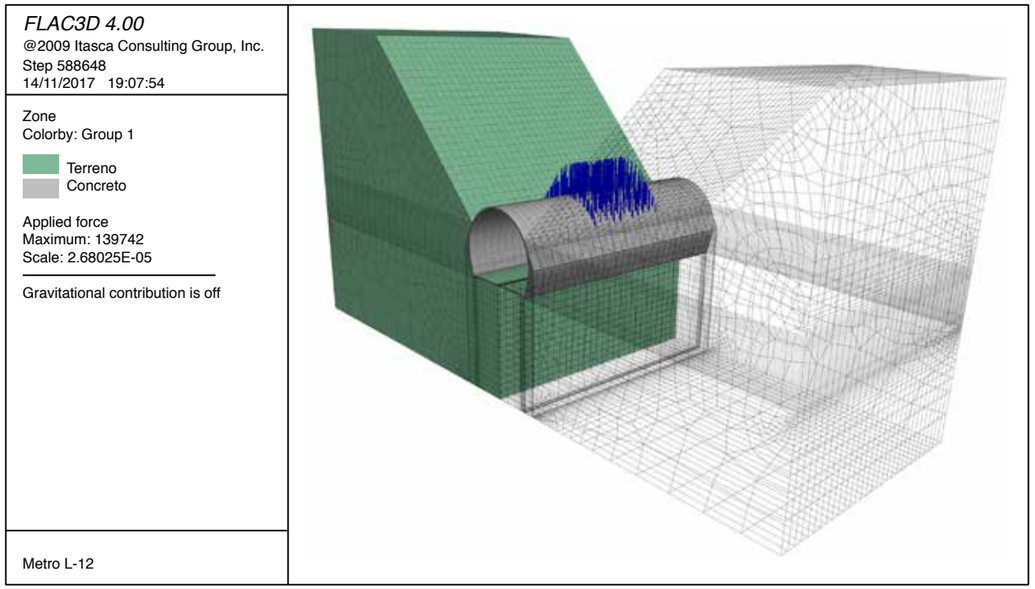
4.3.2.1. Capacidad de carga del sistema estructural

Finalmente, después de calibrar el modelo de diferencias finitas, se llevó a cabo una serie de verificaciones para estimar cuál sería la presión máxima de aflojamiento que el sistema podría soportar. Se construyó un modelo simple, en el cual se aplicó de manera incremental una presión vertical sobre el arco sólido de concreto lanzado en una longitud de 10 metros de túnel, hasta que se produjo la falla (Figura 24). Estas pruebas se hicieron para distintos módulos de elasticidad del terreno, abarcando todo el rango de valores que éste puede adquirir a lo largo del trazo de esta obra en particular.

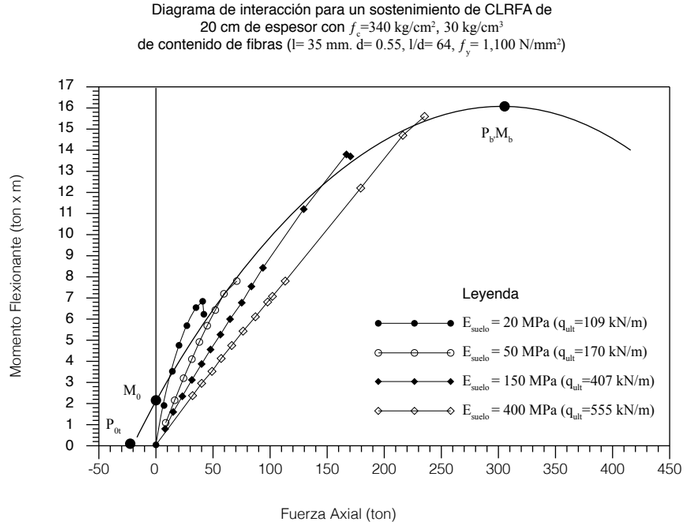
Un modelo 2D de elementos finitos fue nuevamente calibrado con el modelo de diferencias finitas 3D para obtener el mismo comportamiento en términos de esfuerzo, deformación, desplazamientos y modos de falla; los elementos mecánicos del concreto lanzado obtenidos del modelo 2D se comparan con el diagrama de interacción, siendo posible verificar que, de hecho, estas fuerzas en el estado de falla coinciden muy bien con la envolvente resistencia.



▲ Figura 23. Comparación de resultados Plaxis 3D y FLAC3D para los desplazamientos horizontales en hastiales.



▲ Figura 24. Malla de diferencias finitas del modelo para el estudio de capacidad de carga ante presiones de aflojamiento.



▲ Figura 25. Diagrama de interacción y elementos mecánicos obtenidos del análisis de cargas de aflojamiento sobre la clave.

5. Conclusiones

La metodología para el diseño y re-diseño de elementos de concreto lanzado en túneles que se presenta en este artículo corresponde con el estado del arte actual. Es importante considerar que en muchos países, incluido México, estas técnicas aún no representan la práctica común y por ende deben comenzar a difundirse ampliamente; ya que este tipo de tecnologías permiten realizar diseños más seguros, eficientes y económicos. Los logros alcanzados en las obras del túnel localizado al poniente de la Ciudad de México son un buen ejemplo de lo anterior, en especial, la supresión de la doble malla electro soldada con sus correspondientes ahorros en tiempo y acero.

Por otro lado, cabe destacar que ambos programas, FLAC^{3D} y Plaxis, son herramientas de cálculo muy poderosas que permiten hacer varias consideraciones durante la modelización de problemas geomecánicos complejos; esto resulta bastante práctico cuando los modelos son alimentados adecuadamente, ya que los resultados obtenidos pueden llegar a ser muy realistas. Sin embargo, no debe esperarse que ambas aproximaciones constitutivas proporcionen exactamente los mismos resultados, pues cada una tiene su propia formulación y su propia metodología para obtener resultados: Plaxis soluciona los problemas de manera implícita, es decir, lleva a cabo iteraciones para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema, mientras que FLAC aproxima éstas ecuaciones en ecuaciones de diferencia.

Finalmente, cabe destacar que la metodología mostrada en este artículo para mitigar el problema de dependencia de la malla es práctica y proporciona resultados razonables. Cabe destacar también que, en el caso de las diferencias finitas, el tratamiento matemático desarrollado en García (2017) genera mejores resultados que la técnica regularizadora implícita en el modelo SM para el programa de elementos finitos Plaxis.

6. Referencias

Carnovale, D. J. (2013). Behaviour and analysis of steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete subjected to reversed cyclic loading: a pilot investigation (Doctoral dissertation).

de Rivaz, B. (2011). Fibre reinforced spray concrete for compliance with site safety requirement. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2(2), 48-58.

EFNARC Sprayed Concrete Technical Committee. (2011) Three Point Bending Test on Square Panel with Notch. ENC 371 FTC V1.1_18-06-11

EN, C. (2006). 14488-5: Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fiber reinforced slab specimens. ICS 91.100.30

García, G. (2017). Estudio comparativo del comportamiento del concreto lanzado en túneles a partir de distintas aproximaciones constitutivas; Tesis de maestría, UNAM, México.

Neves, R. D., y De Almeida, J. F. (2005). Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. Structural concrete, 6(1), 1-8.

Sánchez, F. (2016). El colapso del túnel Xicotepec I Una investigación sobre sus causas y un estudio para su reconstrucción. Revista Obras Públicas 2016 / Número 3579: Túneles (Monográfico). España.

Schädlich, B., Schweiger, H. F., Marcher, T., & Saurer, E. (2014, January). Application of a novel constitutive shotcrete model to tunneling. In ISRM Regional Symposium-EUROCK 2014. International Society for Rock Mechanics.

Vandewalle, L. 2003: Design with σ-ε method; Proceedings of the RILEM TC 162-TDF Workshop: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete. Schnütgen, B. & Vandewalle, L. Editors.

TERRENOS COMPLICADOS REQUIEREN

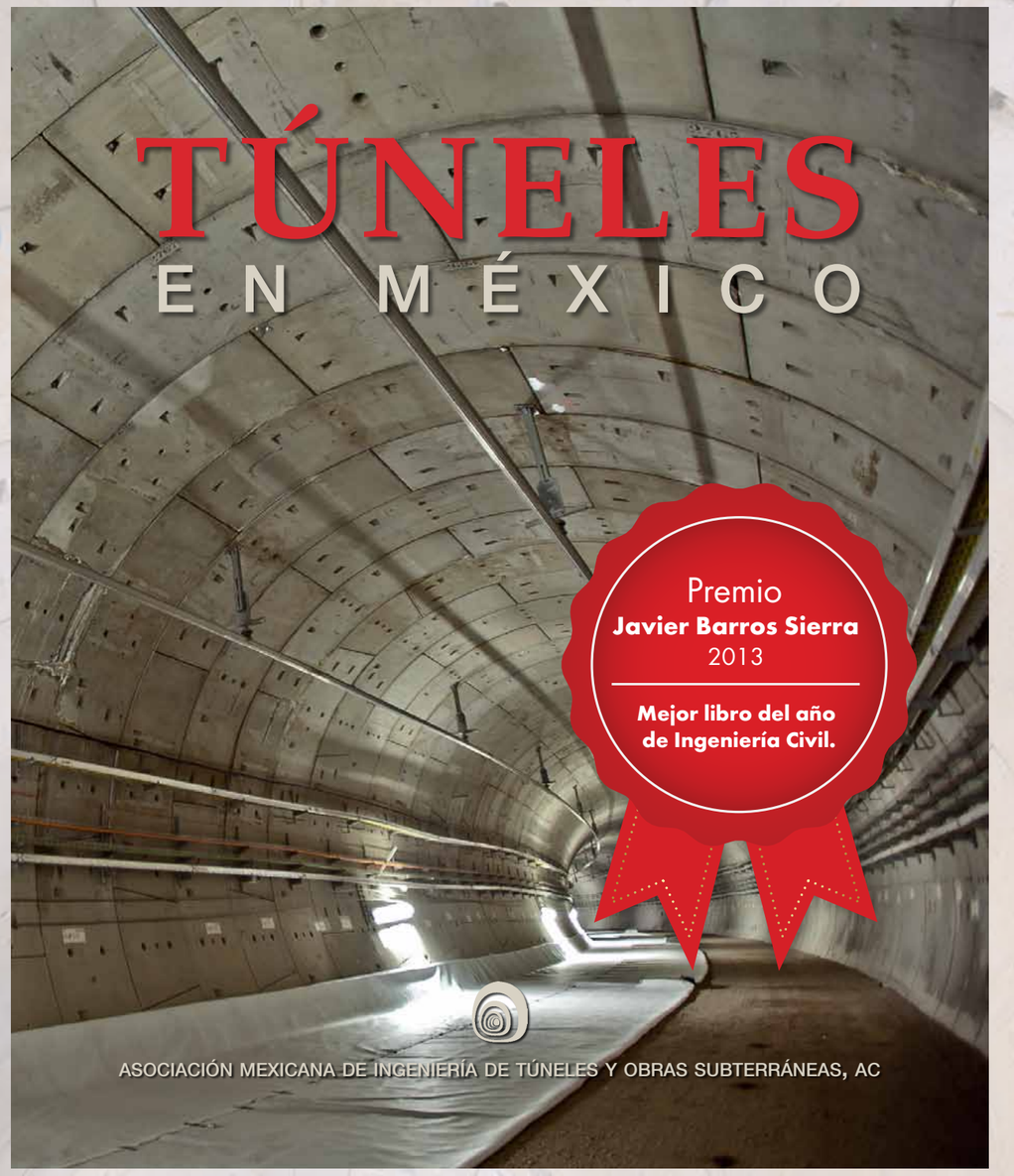
SOLUCIONES EFICACES

UN PROYECTO
ÉPICO EN MÉXICO

Con uno de los tres lotes de Robbins ya completado en el masivo Túnel Emisor Oriente de 62 km (39 mi) en la Ciudad de México, los esfuerzos de los técnicos están enfocados en completar los Lotes 4 y 5 que presentan condiciones difíciles de terreno mixto. Las EPB TBMs personalizadas están excavando a través de algunas de las condiciones más desafiantes del planeta, desde basalto abrasivo hasta arcillas y boleos.

Robbins
RELIABLE | RESPONSIVE

TÚNELES
EN MÉXICO



Premio
Javier Barros Sierra
2013

Mejor libro del año de Ingeniería Civil.

ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS, AC

Cuota de recuperación por ejemplar

$1,000.00 M.N.

Información

AMITOS
Tel. (+52 55) 5528 3611

Gestión del riesgo en la construcción de túneles

Un enfoque común para todas las partes involucradas

Artículo presentado en el Congreso Internacional de ITA en Dubái 2017.

Ing. Michael PROPRENTER
iC consulenten ZT GmbH, Vienna, Austria
m.proprenter@ic-group.org

Ing. Gerold LENZ
iC consulenten ZT GmbH, Salzburg, Austria
g.lenz@ic-group.org

La gestión del riesgo en la construcción de túneles requiere de un enfoque conjunto para todas las partes involucradas en el proyecto, los representantes de los clientes, los diseñadores y los contratistas, así como el equipo de supervisión y los expertos en geología y geotecnia del sitio. Sólo un enfoque común y una meta conjunta para lograr una construcción segura y económica, harán posible la culminación exitosa y satisfactoria del proyecto. El presente artículo muestra el enfoque austriaco para la realización de túneles y estructuras subterráneas basado en el Lineamiento Austriaco para el Diseño Geotécnico de Estructuras Subterráneas (Ref.1). El procedimiento está avalado con ejemplos de aplicaciones reales en grandes proyectos de túneles.

La gestión del riesgo en proyectos de construcción de túneles comienza no sólo con el inicio de la construcción, sino desde las primeras fases del diseño. Todos los riesgos geotécnicos deben ser evaluados por el equipo de diseño, previamente al inicio de su trabajo y tienen que ser contemplados –en la medida de lo posible– dentro de las soluciones aportadas. Cualquier riesgo restante debe poder ser atendido durante la construcción y será considerado en el plan de gestión de la seguridad geotécnica, el cual se prepara durante el diseño de la licitación y forma parte de los documentos del contrato.

El plan de gestión de seguridad geotécnica es un documento del diseño que incluye información acerca del comportamiento previsto de los túneles en cuestión tomando en cuenta las condiciones subterráneas y las posibilidades para su soporte inicial. El comportamiento esperado debe estar acotado mediante valores de alarma y alerta, para las deformaciones, la entrada de agua, los esfuerzos, etc. El contenido cubre también todas las funciones y responsabilidades de las partes involucradas, así como la información de contacto del personal invitado. Se presentan todos los procesos y procedimientos para los casos normales y también para los excepcionales y se definen las acciones de intervención.

Durante la construcción del túnel, el equipo encargado de la gestión de la seguridad geotécnica de manera cotidiana está compuesto por lo general por expertos en geotecnia y geología y la supervisión del sitio, unos por parte del cliente y otros por parte del contratista. Durante las juntas diarias de rutina, se analizan los resultados del monitoreo y, en caso de ser necesario, se toman las medidas correspondientes. En caso de requerirse, se incluirá un diseñador para adaptar el diseño y actualizar el plan de gestión de seguridad geotécnico.

El fondo teórico se mostrará en la práctica mediante experiencias realizadas en proyectos de túneles de gran relevancia en Austria, como el Túnel base de Semmering, el túnel Lainz o el túnel Wienerwald.

El Túnel base de Semmering es un túnel ferroviario de 27 km de longitud en un ambiente montañoso con una cobertura de 900 m, el cual está actualmente en construcción.

La longitud total de los dos proyectos adyacentes, túnel Lainz y túnel Wienerwald es de aproximadamente 26 km, con 24 km construidos mediante barrenación y voladura. El túnel Lainz está situado principalmente en un ambiente urbano bajo una cobertura poco profunda; y para el túnel Wienerwald, la cobertura oscila entre 10 m en los portales hasta un máximo de 200 metros. Los túneles ya se encuentran operando exitosamente.

Palabras clave: Riesgo y gestión de la seguridad en la construcción de túneles.

1.- Introducción

Los proyectos de construcción de túneles siempre se realizarán con cierto grado de riesgo. Aún con un diseño sofisticado y una amplia campaña de investigación no pueden evitarse riesgos geológicos y geotécnicos, así como aquéllos relacionados con los procedimientos de construcción. Las condiciones subterráneas incluyen una variedad de aspectos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos que no pueden ser pronosticados al detalle. Adicionalmente, tienen que hacerse durante el diseño algunas simplificaciones y suposiciones en el modelado de lo subterráneo mismas que también generan un cierto grado de incertidumbre.

Con el objetivo de minimizar estos riesgos restantes para el dueño, el contratista y especialmente para el público durante la construcción, el diseñador tiene que crear herramientas específicas que deben implementarse por todas las partes involucradas durante la construcción.

La gestión de seguridad geotécnica es una de esas herramientas, y será elaborada por el diseñador durante la preparación de los documentos de licitación y eventualmente será parte del contrato de la obra. Los capítulos siguientes describirán la creación de los documentos requeridos para la gestión de la seguridad y su implementación durante la fase de construcción.

2.- Plan de gestión de la seguridad geotécnica

2.1. Enfoque general

El enfoque general se basa en la filosofía de evaluar riesgos geotécnicos, tomar medidas apropiadas de diseño para eliminar riesgos y en el caso de que prevalezcan riesgos aceptables, desarrollar medidas para manejarlos durante la construcción. Los posibles resultados de aceptar riesgos remanentes aceptables deberán limitarse al mínimo en el resultado final en términos de aspectos financieros o de programa.

Mediante la aplicación del método observacional acorde al Eurocode 7 [1], el comportamiento esperado del sistema túnel y medio subterráneo debe compararse con el comportamiento real en el campo. El plan de gestión de seguridad incluye toda la información requerida para llevar a cabo dicha tarea y lidiar con cualquier situación inesperada. Éste define las funciones y responsabilidades para todas las partes involucradas.

2.2. Evaluación de riesgos geotécnicos

En la mayoría de los proyectos de túneles, el diseñador se enfrenta a un suelo subterráneo heterogéneo y a condiciones geotécnicas variables. Con base en experiencia y análisis, deben evaluarse escenarios de posibles fallas o peligros tomando en cuenta el ambiente específico del proyecto. Tales escenarios pueden incluir lo siguiente:

- Inestabilidad de las paredes del túnel
- Falla en bloque
- Alta utilización de la capacidad de carga
- Falla del soporte inicial
- Expansión
- Entradas inesperadas de agua
- Gases tóxicos
- Deformaciones excesivas
- Asentamientos excesivos
- Vibraciones excesivas

Los tipos y rangos de riesgos deber ser evaluados en estrecha colaboración entre ingenieros, geólogos, hidrogeólogos y cualquier otro especialista requerido, bajo circunstancias específicas. Todos los escenarios posibles tienen que ser considerados y resumidos de forma clara e inequívoca.

2.3. Consideración de riesgos geotécnicos en el diseño

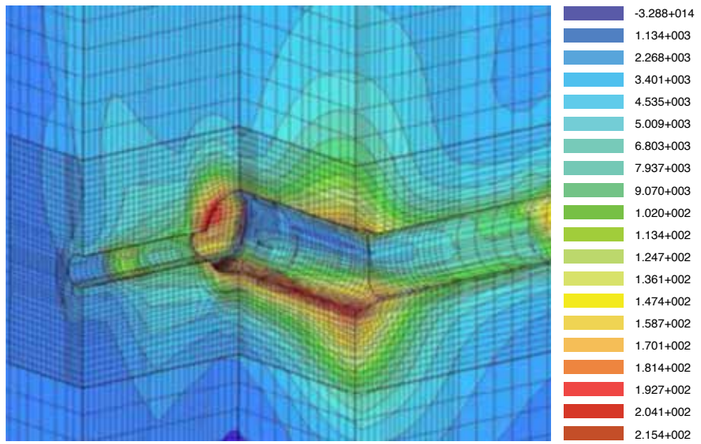
Una vez identificados los riesgos geotécnicos asignados al proyecto, el equipo de diseño debe desarrollar soluciones para compensar estos riesgos. Procedimientos que incluyen métodos de soporte, conceptos para excavar el frente del túnel, o pre tratamiento del medio subterráneo, tienen que ser elaborados y su adecuación tiene que ser confirmada mediante análisis. Estos análisis pueden incluir cálculos analíticos o bien sofisticados en dos o tres dimensiones, donde todos los pasos de la excavación sean modelados en detalle. La Figura 1 muestra un ejemplo de cálculo tridimensional mediante elementos finitos para un complicado frente de excavación de un túnel.

Los métodos de soporte diseñados tienen que ser presentadas de manera clara para su implementación en el campo. La Figura 2 incluye un ejemplo típico de métodos de soporte desarrollados para ciertas condiciones del medio subterráneo donde se esperan grandes deformaciones. En este caso particular, los controladores de esfuerzos del revestimiento (elementos CER) deben permitir mayores deformaciones sin que se exceda la capacidad de carga del revestimiento de concreto lanzado.

Cualquier riesgo remanente en el proyecto debe ser aceptable para todas las partes involucradas en el diseño y debe estar en concordancia con todos los requerimientos y limitaciones dadas por el entorno del proyecto.

Para los riesgos restantes, el diseñador debe proveer herramientas para el equipo presente en el sitio de construcción para controlar que el comportamiento del sistema túnel, soporte y medio subterráneo, se basen en los resultados del diseño. La definición del comportamiento esperado, así como los niveles de alerta y alarma para varios datos medibles deberán proporcionarse, los cuales están basados en los resultados de los análisis realizados durante la fase de diseño.

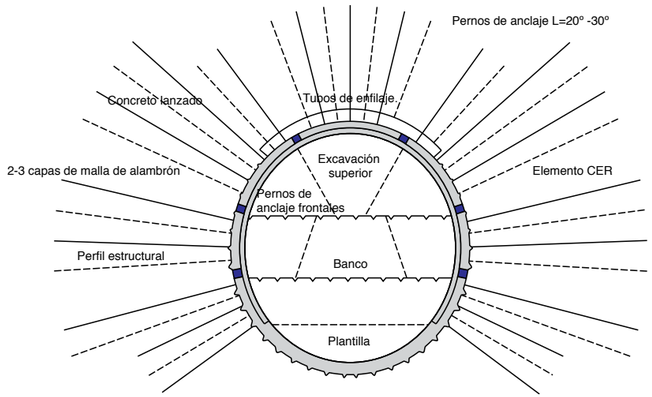
El plan de gestión de seguridad geotécnica debe garantizar un proceso seguro y económico tomando en consideración



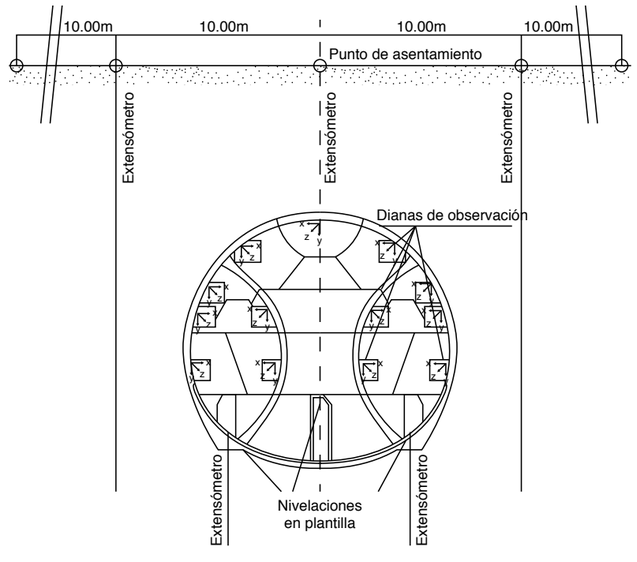
▲ Figura 1. Resultado de cálculo en 3D.

aspectos inciertos y definiendo el comportamiento esperado y sus elementos y mecanismos de control. El plan de gestión de seguridad geotécnica incluye como mínimo el siguiente contenido:

- Detalles de contacto de todas las partes del proyecto
- Definición de tareas para cada parte
- Agendas de reuniones y procedimientos
- Programa de monitoreo y frecuencia
- Flujo de información
- Definición del comportamiento (“normal”) esperado
- Valores de alarma y alerta
- Organización en caso de un comportamiento inesperado
- Contramedidas según sea el caso



▲ Figura 2. Métodos de soporte incluyendo controladores de esfuerzos del revestimiento.



▲ Figura 3. Sección de monitoreo.

Durante la construcción, el plan de gestión de seguridad geotécnica deberá ser adaptado conforme al comportamiento del sistema y a las experiencias del sitio. En caso de un comportamiento divergente del sistema o cualquier otro fenómeno inesperado, la razón y origen deberán ser evaluados y después de un detallado análisis el diseño deberá ser modificado en consecuencia.

En el caso de divergencias, debe evaluarse la razón y deberán decidirse las medidas respectivas. Esto puede ser una adaptación de las medidas de soporte previstas o una re evaluación de los datos aportados con respecto a las condiciones subterráneas.

2.4. La gestión del riesgo durante la fase de construcción

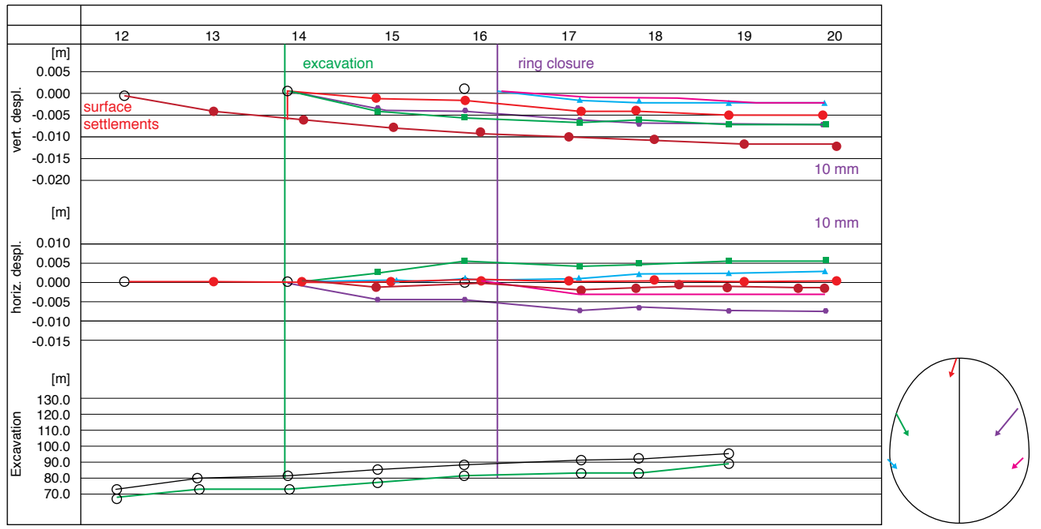
El plan de gestión de seguridad y los documentos de diseño relacionados, tales como dibujos o especificaciones técnicas deberán incluir todas las herramientas requeridas para controlar el comportamiento esperado del sistema. El enfoque observacional según la Ref. [2] se utiliza para confirmar el comportamiento esperado o detectar el inesperado.

Un gran número de datos son medidos por el equipo de monitoreo en el sitio con el fin de aportar información acerca de los aspectos siguientes:

- Desplazamientos en el túnel
- Cargas o deformaciones unitarias del revestimiento de concreto lanzado y pernos de anclaje
- Asentamiento de la superficie, construcciones o infraestructura
- Deformación del terreno cerca de construcciones
- Deflexión de la infraestructura o de construcciones
- Vibración
- Entradas de agua
- Presencia de gas
- Fenómeno de expansión (desplazamientos)

La Figura 3 muestra un arreglo típico de monitoreo para una situación con baja cobertura, incluyendo puntos de asentamiento y extensómetros en la superficie, dianas de observación, nivelaciones en plantilla y extensómetros en el túnel.

Los datos medidos son proporcionados a los ingenieros geotecnistas del sitio, quienes son la conexión entre el equipo de diseño y el sitio de construcción. El ingeniero geotecnista evalúa y analiza la información y compara lo realmente observado con el comportamiento esperado definido por la información mencionada con anterioridad. Los análisis y la evaluación



▲ Figura 4. Curvas típicas tiempo-deflexión.

del monitoreo de desplazamiento en 3D, incluyen por ejemplo diagramas desplazamiento-tiempo, diagramas distancia-desplazamiento, curvas de deflexión (diagramas de estado) y líneas de tendencia (ver [5]). Adicionalmente el ingeniero geotecnista evalúa las lecturas de inclinómetros y extensómetros así como los esfuerzos o las deformaciones unitarias en el revestimiento del concreto lanzado y de los pernos de anclaje. La Figura 4 muestra un ejemplo de un diagrama desplazamiento-tiempo para todas las dianas de observación de una sección individual de monitoreo.

En el caso de un comportamiento divergente del sistema, es tarea del ingeniero geotecnista en conjunto con el diseñador el desarrollar soluciones adecuadas. Estas soluciones pueden incluir la adaptación de los métodos de soporte o el concepto de excavación del frente , o reconfirmar las hipótesis hechas durante la fase de diseño.

Los resultados de la evaluación y la interpretación son proporcionados al diseñador, la supervisión del sitio, los geólogos y el contratista de manera cotidiana. Se realizan reuniones periódicas en el sitio con el fin de discutir los resultados y definir medidas apropiadas en caso necesario.

Es de máxima importancia que las diferentes partes involucradas estén en constante intercambio de información y discusión para llevar a cabo un proceso de construcción seguro. Con tal enfoque, un posible evento desencadenado por riesgos remanentes será detectado en una etapa temprana y se tomarán las contramedidas apropiadas.

3. Ejemplos en sitio

Los capítulos siguientes incluyen ejemplos de la implementación de la gestión de seguridad geotécnica de grandes proyectos de construcción de túneles en Austria.

3.1. Túnel base de Semmering

3.1.1. Introducción

El Túnel base de Semmering, uno de los proyectos de infraestructura más importantes de Europa, consiste en dos túneles de una vía de 27.3 km de longitud, numerosos pasillos transversales y una compleja estación de emergencia subterránea, con dos lumbreras de más de 420 m de profundidad. El acceso temporal es proporcionado por un túnel de acceso de 1 km de largo, con dos lumbreras subterráneas de 250 m y dos lumbreras de 100 m desde la superficie.

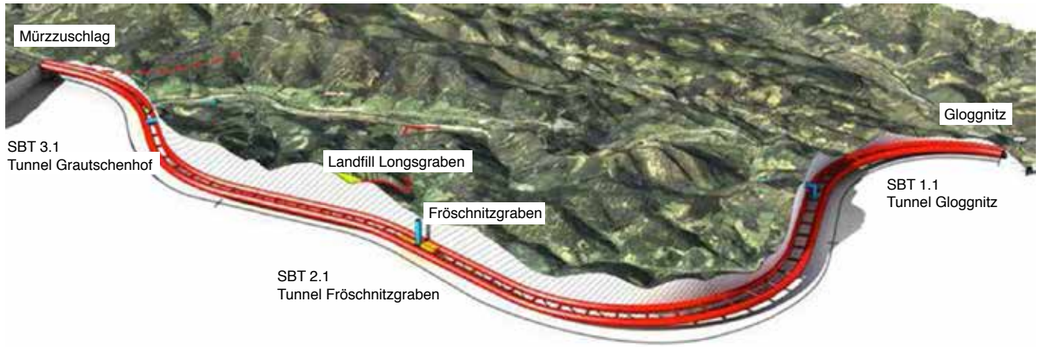
Se planean varios tipos de grandes cavernas, las cuales son previstas para un uso temporal para propósitos de construcción, como un acceso intermedio, y espacio para instalaciones, o permanentes para la estación subterránea de emergencia. Las dimensiones de las cavernas más grandes están en el rango de 25 m x 16 m.

La máxima cobertura por encima de las cavernas es de aproximadamente 500 m en condiciones geológicas difíciles, con grandes zonas de falla y abundantes entradas de agua, lo cual requiere de complicados conceptos de excavación del frente, amplias medidas de soporte y trabajos de mejoramiento del terreno parciales, como inyecciones.

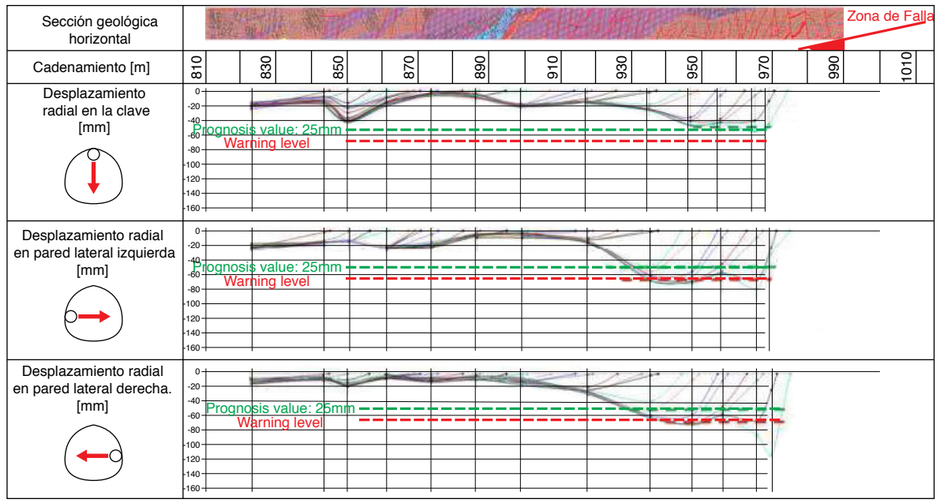
3.1.2. Aplicación de la gestión de seguridad geotécnica

Se presenta un ejemplo representativo de la aplicación de la gestión de seguridad geotécnica, tomado de la excavación del túnel de acceso Göstritz de 1 km de largo. Para la sección descrita, el pronóstico geológico indicó condiciones comparativamente favorables con las del túnel principalmente situado en rocas compactas carbonatadas, como la Rauhwacke y la Brecha carbonatada.. El diseño del túnel, basado en esta predicción, anticipó una sección transversal con una plantilla abierta, un revestimiento ligero de concreto lanzado con un espesor de 10-20 cm y avances con longitud de 1.70-2.20 m. Las deformaciones esperadas estaban en el rango de unos cuantos centímetros. El nivel de advertencia dentro del Plan de Gestión de Seguridad Geotécnica (GSMP por sus siglas en inglés) fue definido como un rebasamiento de los desplazamientos esperados (en este caso, un valor de pronóstico de 25 mm) del 25%.

Durante la excavación, las condiciones encontradas en la sección estudiada coincidió en gran medida con lo esperado. La excavación avanzó en la Brecha carbonatada. El monitoreo geotécnico se realizó usando monitoreos de desplazamiento,



▲ Figura 5. Túnel base de Semmering.



▲ Figura 6. Situación geológica y desarrollo de los desplazamientos espaciales, túnel de acceso Göstritz.

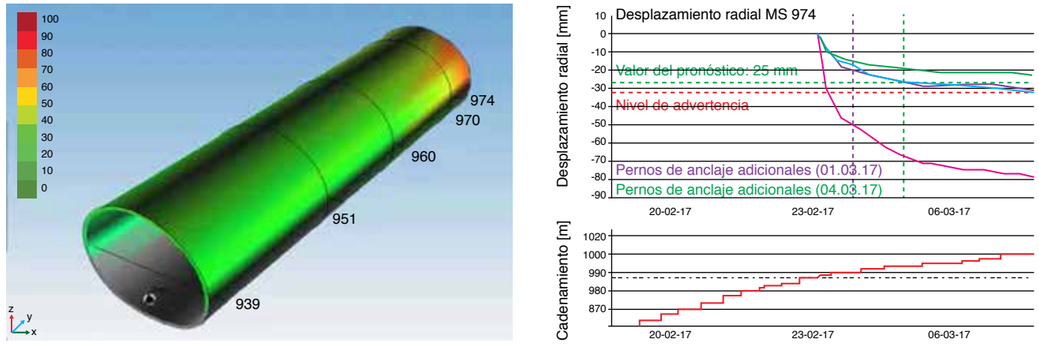
absolutos en 3D de manera cotidiana. Las secciones de monitoreo (MS) fueron establecidas a una distancia aproximada de 10 m, y consistieron en cinco dianas de observación para desplazamiento, en cada una.

Adicionalmente al monitoreo de desplazamiento, un retro análisis de la utilización del revestimiento de concreto lanzado fue realizado utilizando un "método híbrido" desarrollado por Match, Hellmich y Lackner (Ref. [3], [4] y [5]). Este método evalúa las deformaciones unitarias en el revestimiento de concreto lanzado a partir de los desplazamientos observados y lo combina con un modelo constitutivo termo mecánico para concreto lanzado. Para un uso diario, este procedimiento fue integrado en el paquete de software TunnelMonitor (Ref.[7], ver Figura 7).

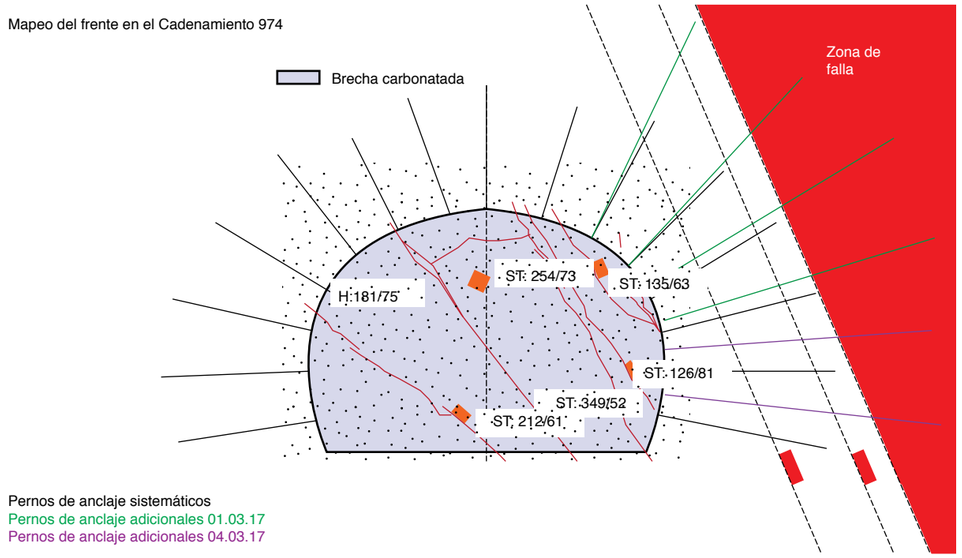
Hasta el cadenamiento 960, los desplazamientos observados se encontraron dentro del rango esperado. En MS 970, se observó un aumento significativo de los desplazamientos en la pared lateral derecha, los cuales se fueron acentuando más con el avance de la excavación (ver Figura 6).

Los niveles de advertencia se excedieron en la tercera lectura realizada 3 días después de la excavación, mientras que las condiciones encontradas en el frente del túnel no cambiaron de forma significativa. Los ingenieros del sitio esperaban una zona de falla que cruzaría el túnel en algún lugar adelante del frente, como una razón para ello. Al mismo tiempo, el retro análisis de la utilización del revestimiento mostró una alta utilización en la pared lateral derecha (ver Figura 7).

Siguiendo los procedimientos del comportamiento inesperado en el GSMP, se agregaron pernos de anclaje en las paredes laterales. Adicionalmente, se realizaron sondeos exploratorios para investigar



▲ Figura 7. Utilización de revestimiento (izquierda) e historial tiempo-desplazamiento MS 974 (derecha).



▲ Figura 8. Condiciones geológicas encontradas en el frente, modelo geotécnico en MS 974.

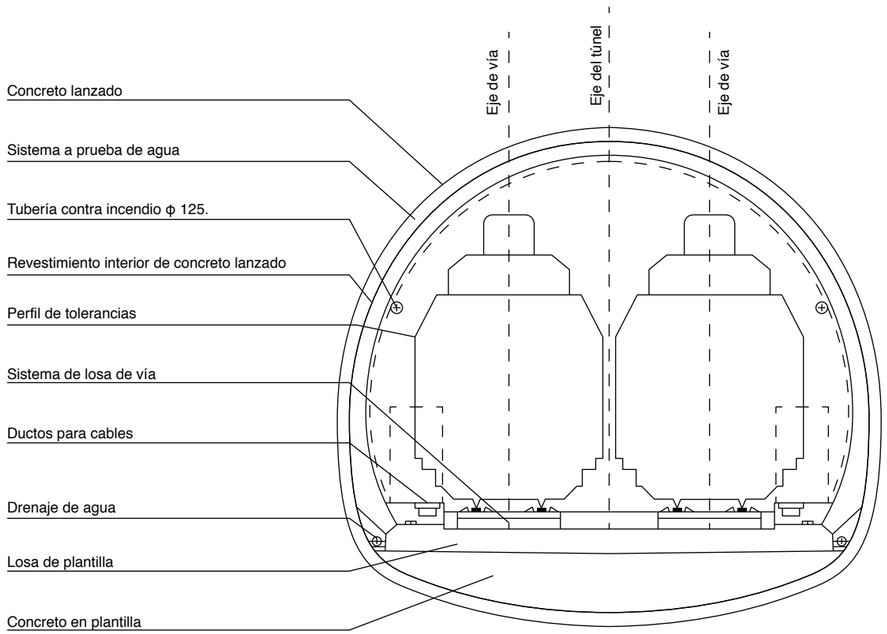
las condiciones adelante del frente, sin indicar condiciones diferentes. Incrementos substanciales en los desplazamientos en los días siguientes no indicaron una mejora significativa de la situación. Por este motivo, se llevó a cabo una segunda campaña de soporte, la cual finalmente logró la estabilización de los desplazamientos (ver Figura 8). Los avances en la excavación finalmente confirmaron las suposiciones, al encontrarse una zona de falla importante con un espesor de más de 10 m al cruzar el túnel en un ángulo agudo de aproximadamente 20° de derecha a izquierda. Debido a la desfavorable orientación de la zona de falla, ésta no se había detectado durante las perforaciones exploratorias.

Una aplicación consecuente de la gestión de seguridad geotécnica llevó en este caso a una solución exitosa para una situación inesperada. Además, el conocimiento adicional obtenido durante esta situación condujo a una adaptación subsecuente de las medidas de soporte para las futuras secciones del túnel ubicadas directamente en la zona de falla.

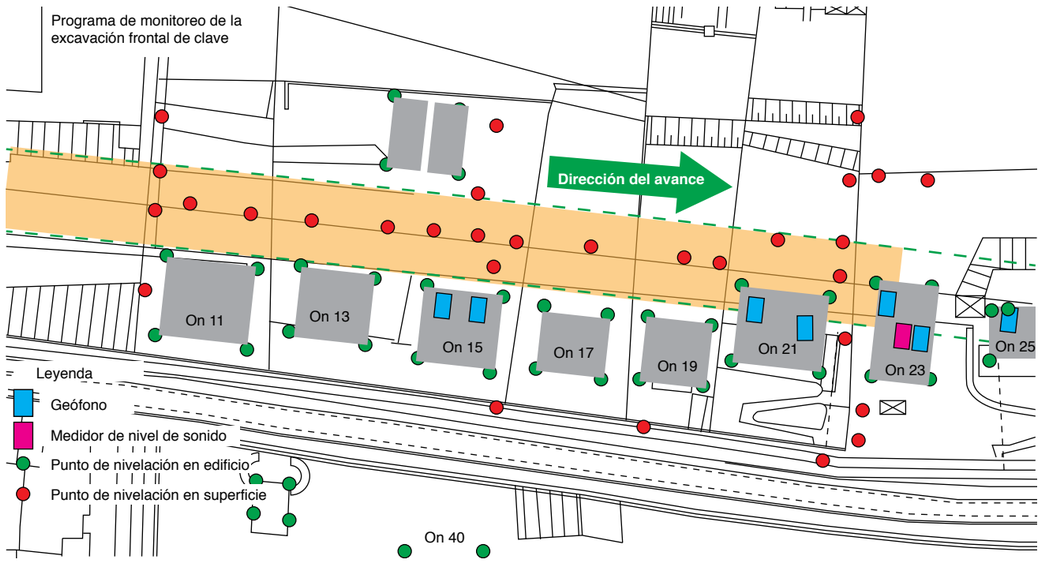
3.2. Túneles Lainz y Wienerwald

3.2.1. Introducción

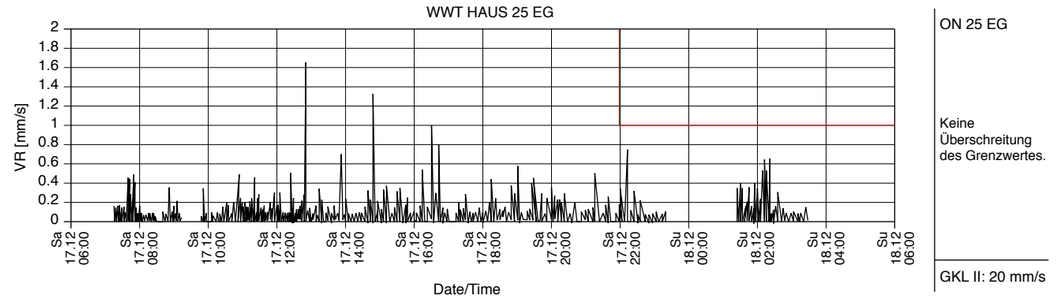
La longitud total de los dos proyectos adyacentes el túnel Lainz y el túnel Wienerwarl es de aproximadamente 26 km, de los cuales 24 km están construidos utilizando el método de construcción de túneles mediante minado (barrenación y voladura).



▲ Figura 9. Túnel de doble vía.



▲ Figura 10. Sistema medidor del nivel de sonido. / Sistema de monitoreo de vibraciones.



▲ Figura 11. Monitoreo de vibraciones (los valores límite son diferentes en el día y la noche).

Varias estructuras tales como tubos de una o dos vías, secciones de ampliación de forma cónica o galerías y lumbreras de emergencia son implementadas. Muchas secciones del alineamiento pasan por debajo de áreas residenciales o importantes infraestructuras de tráfico con una cobertura poco profunda. En contraste, otros tramos tienen que cruzar amplias zonas de falla con una cobertura de hasta 200 m.

3.2.2. Aplicación de la gestión de seguridad geotécnica

A lo largo del alineamiento de los túneles Lainzer y Wienerwald, numerosas áreas residenciales (ver Figura 9) son afectadas por el ruido y las vibraciones de la construcción. Algunos de estos edificios están ubicados justo encima del túnel o a menos de un diámetro del túnel. La Figura 9 muestra la disposición de secciones de monitoreo para algunas ubicaciones con una cobertura poco profunda.

El plan de gestión de seguridad incluye valores de alerta para ruidos y vibraciones diferentes para el día y la noche. El alcance del trabajo del equipo de monitoreo en sitio incluyó la instalación de medidores de niveles de sonido y un sistema de monitoreo de vibraciones, así como su supervisión. Se realizó de manera cotidiana una evaluación detallada de las vibraciones debidas a las voladuras así como una interpretación de los resultados del monitoreo. Con base en los resultados, se realizaron adaptaciones de las secuencias de excavación así como del patrón de la voladura.

El equipo de monitoreo permanente fue activado al alcanzarse un valor detonador de activación. La recuperación de los datos también fue posible gracias a un módem GSM para una evaluación posterior más detallada. Adicionalmente, todos los datos monitoreados fueron visualizados automáticamente en una plataforma de internet con una frecuencia periódica de actualización. El equipo también permitió la notificación inmediata por SMS a teléfonos móviles del personal de supervisión de la construcción cuando los valores de alerta eran rebasados. La Figura 11 muestra ejemplo de resultados del monitoreo de vibraciones en un diagrama específico representando una duración de 24 horas.

4. Conclusión

Los proyectos de túneles siempre son propensos tanto a riesgos remanentes como a incertidumbres, ya que el componente más importante es el medio subterráneo, el cual no puede ser previsto al detalle. Por lo tanto, debe considerarse el uso de herramientas adecuadas para controlar y confirmar el comportamiento esperado del medio subterráneo y de la excavación y enfrentarse a situaciones inesperadas.

Una de estas herramientas es el plan de gestión de seguridad geotécnica, el cual incluye todos los recursos y medidas para un manejo adecuado de cualquier acontecimiento que pueda ocurrir durante la construcción.

Un equipo compacto de expertos en el diseño y en el sitio incluyendo ingenieros geotecnistas, geólogos, expertos en monitoreo, supervisores de obra y contratistas deben lidiar con las tareas requeridas de manera cotidiana y basándose en un procedimiento de evaluación previamente definido. Este trabajo en conjunto conduce a un proyecto exitoso tanto en términos de seguridad como en el aspecto económico.

Referencias

[1] ÖGG - Austrian Society for Geomechanics. 2008. Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures. ÖGG: Salzburg.

[2] ÖNORM EN 1997-1. 2009. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules (Consolidated version). Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON): Vienna.

[3] Hellmich, C. 1999. Shotcrete as port of the new Austrian tunneling method: from thermochemomecahnical material modeling to structural analysis and safety assessment of tunnels. Thesis (PhD Civil Engineering), Technical University Vienna

[4] Lackner, R., et al. 2005. Thermochemomechanics of cement-based materials at finer scales of observation: Application to hybrid analyses of shotcrete tunnel linings. Institute for Strength of Materials, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.

[5] Macht, J. 2002. Hybrid analyses of shotcrete tunnel linings: Assessment and online monitoring of the level of loading. Thesis (PhD Civil Engineering), Technical University Vienna

[6] ÖGG - Austrian Society for Geomechanics. 2014. Geotechical Monitoring in Conventional Tunnelling – Handbook. ÖGG: Salzburg.

[7] Tunnel:Monitor [computer Software]. 2016. Retrieved from www. tunnelmonitor.com.

[8] PROPRENTER M. (2017) and WAGNER O.K., "Semmering Base Tunnel 17 miles of SEM and TBM tunneling under challenging conditions in Austria", Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2017 (RETC 2017), San Diego, USA

[9] PROPRENTER M. (2017) and WAGNER O.K., "Semmering Base Tunnel – Large Caverns in Challenging Conditions", Proceedings World Tunnel Congress 2017 (WTC 2017), Bergen, Norway

[10] PROPRENTER M. (2007), MORITZ B. and EGGER M., "Geotechnical monitoring at the Lainz and Wienerwald tunnel project", communiCation 1. edition 9/2007 (iC consulenten magazine)

AGENDA

Octubre 2018

18 - 19

YM CONFERENCE "TUNNELLING 4.0: DIGITAL INNOVATION, AUTOMATION AND APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES IN TUNNELLING AND UNDERGROUND CONSTRUCTION"

Bologna, Italy
Tel.: +39 (0) 2 25 71 58 05

29 – 3 noviembre

"THE 10TH ASIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM (ARMS10)"

Singapur
E-mail: arms10@meetmatt.net
Sitio: arms10.org/public.asp?page=home.htm

Noviembre 2018

05 - 07

16TH WORLD CONFERENCE OF THE ACUUS

Hong Kong
E-mail: enquiry@acuus2018.hk

07 - 9

XII SEMINARIO ANDINO DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS "FUTURO Y RESPONSABILIDAD DE LA INGENIERÍA SUBTERRÁNEA"

Bogotá, Colombia
E-mail: seminarioactos2018@actoscolombia.org.co
Sitio: www.seminario.actoscolombia.org.co

07 - 10

**XVI CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA "INFRAESTRUCTURA Y RIESGOS GEOTÉCNICOS"
& IV SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA SISMO - GEOTÉCNICA**

Hotel Sochagota, Paipa (Boyacá)
E-mail: scgeotecnia1@gmail.com
E-mail: sociedadcolombianadegeotenia@scg.org.co

27

CONFERENCE ON "BEYOND A TUNNEL VISION"

Bruselas, Bélgica
Sitio: www.beondatunnelvision.eu

Mayo 2019

03 – 09

WORLD TUNNEL CONGRESS 2019

Nápoles, Italia
Sitio: www.wtc2019.com/

Junio 2019

03 - 05

UNDERGROUND CONSTRUCTION PRAGUE 2019 (UC PRAGUE 2019)

Praga, República Checa
E-mail: ps2019@guarant.cz
Sitio: www.ucpague.com

Octubre 2019

06 - 10

WORLD ROAD CONGRESS

Abu Dhabi
Sitio: https://dot.abudhabi.ae/piarc/

Noviembre 2019

17 - 20

XVI CONGRESO PANAMERICANO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA

Cancún, México
E-mail: info@panamerican2019mexico.com
Sitio: www.panamerican2019mexico.com

26 - 28

STUVA 2019

Frankfurt, Alemania
Sitio: www.stuva-expo.com/en/

Mayo 2020

15 – 21

WORLD TUNNEL CONGRESS 2020

Kuala Lumpur, Malasia
Sitio: www.seacetus2017.com/4/443/welcome-to-malaysia/

Actividades
Grupo de Ingenieros Jóvenes

5° Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca

El pasado 16 de agosto de 2018, se llevó a cabo en el Colegio de Ingenieros Civiles de México, el 5° Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en Suelos y Roca, evento organizado en conjunto SMIG-AMITOS.

Para este evento, el GIJ envió cuatro resúmenes de artículos, los cuales fueron aceptados por los presidentes de las Sesiones Técnicas correspondientes y de esos cuatro artículos, se aceptaron dos para presentación oral.

Dentro del programa, se presentaron algunos miembros del GIJ, como el M.I. Fernando García Espinoza, egresado de la maestría en Geotecnia de la UNAM, quien estuvo en la mesa de discusión “Comportamiento Sísmico”, compartiendo información sobre sistemas de contención en excavaciones de hasta 40 m de profundidad. También participó el M.I. José Ángel Castro Nieto, egresado de la maestría en construcción Túneles y Obras Subterráneas de la UNAM, en la mesa de “Instrumentación” exponiendo la Conservación de edificios históricos durante los trabajos para la línea 3 del tren eléctrico de Guadalajara. Respecto a la redacción de artículos, también se contó con la colaboración del M.I. Jorge Bricio Guillén y el M.I. Carlos Omar Vargas Moreno, ambos maestros en ingeniería egresados de la UNAM.

En el área de exposiciones técnicas, el GIJ contó con un stand mediante el cual invitó a todos los jóvenes ingenieros a integrarse al grupo y de esta forma tener un acercamiento con el ámbito de túneles. Al término del simposio, las personas registradas pudieron participar en la rifa del libro Túneles en México como dinámica por parte del GIJ.

Conferencia en UVM

El día 12 de septiembre de 2018, se impartió una plática en las instalaciones de la Universidad del Valle de México campus sur sede Coyoacán, impartida por el Grupo de Ingenieros Jóvenes, con el tema: “Procedimientos de tuneleo en México: aspectos constructivos y de diseño”. Esta plática fue impartida por el M.I. Carlos Ramírez de Arellano, hacia un foro de 98 personas, todos estudiantes de ingeniería civil de aquella universidad. Estas pláticas forman parte de una estrategia de AMITOS por acercar a la Academia al gremio de los túneles y obras subterráneas, así como acercar temas de diseño y construcción de túneles a estudiantes de la carrera de ingeniería civil. Además, al final del evento, se invitó a los estudiantes a formar parte activa del GIJ.

Actividades
XV CONSEJO DE DIRECTORES

Actividades Mesa Directiva XV

Tenemos el gusto de comunicarles, dando continuidad a la información proporcionada en nuestra pasada revista, con respecto a la reunión pendiente con la UCA of SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration en el simposio de la North American Tunneling Conference en Washington, D.C., USA, los días 21 y 22 de junio para discutir la posibilidad de unir a los Estados Unidos de América y a Canadá, al grupo de nuestros países latinoamericanos, al cual hemos denominado “Fórum Latinoamericano”; que dicha reunión se llevó a cabo en un ambiente muy cordial entre amigos entusiastas de los túneles y las obras subterráneas, asistiendo las siguientes personas: Harvey Parker de Harvey Parker Associates; Grover Vargas y Heidi de Fibermesh; David L. Kanagy Cae, director del UCA de SME; Michael F. Roach Chief Estimator de Traylor Bros.; Arthur D. Silber, vicepresidente ejecutivo de Mott McDonald y un servidor Roberto Gonzalez Izquierdo, en representación de AMITOS y desde luego de México, también se tuvo la comunicación virtual con nuestros amigos de Brasil y Canadá.

Se decidió anexarlos a nuestro grupo para lograr un gran frente común de las Américas, el cual fue denominado “Fórum de las Américas”, acordando como puntos iniciales: el nombre anterior en español y en inglés: “Americas Forum”.

Quedamos en determinar un slogan a largo plazo y otro de corto plazo, establecer un diálogo entre nuestros países, compartir los eventos, proyectos de construcción en el futuro, la promoción de ITACUS, la educación, el soporte a los grupos de trabajo de la ITA y el mejoramiento de la industria. Hay que dar consecución a esta unión.

Por otra parte, se realizó con éxito el 5to. Simposio Internacional en Túneles y Obras Subterráneas, evento organizado entre nuestras Asociaciones hermanas la SMIG, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotecnia y AMITOS la Asociación Mexicana de Ingeniería en Túneles y Obras Subterráneas. El programa incluyó varias ponencias magistrales impartidas por diversas autoridades en el medio de los túneles y obras subterráneas tanto nacionales como internacionales, desarrollándolo con nuevas tecnologías y procedimientos constructivos. Atendieron el evento 170 participantes de 63 diferentes empresas privadas, 107 estudiantes becados, así como 14 empresas con stands en la exposición especializada.

▲ XVI Consejo Directivo. De izquierda a derecha aparecen los Ingenieros: Jorge López, Mario Torres, Leonardo Guzmán, José Anselmo Pérez, Fermín Sánchez, Carlos Ramírez de Arellano y Jorge Armando Rábago.

Actividades
XV CONSEJO DE DIRECTORES

Puntos relevantes comentados en las Asambleas Ordinaria y Extraordinaria

Creemos que podremos hacer un resumen ejecutivo de las ultimas actividades de la XV Mesa Directiva, si tomamos como base lo informado en las mencionadas asambleas, resaltando sólo los más importantes, para lo cual podemos tener los siguientes:

Reuniones mensuales exitosas y continuación con el Comité Editorial aumentando la calidad de nuestra publicación trimestral. Se reconoció a nuestros anunciantes por su patrocinio y apoyo para lograr un resultado económico positivo en la impresión de la revista.

Asimismo, se informó el continuo apoyo y soporte a la Maestría en Ingeniería Civil con especialidad en Túneles y Obras Subterráneas, con maestros de AMITOS y los diferentes cursos internacionales que se lograron realizar con el apoyo de la Fundación de la ITA "International Tunnelling Association", ITACET.

Cabe resaltar como uno de nuestros principales logros la creación del Grupo de Ingenieros Jóvenes, que representa un aumento de más del doble de los asociados de AMITOS, lo cual es de suma importancia para los ingenieros jóvenes que abren sus expectativas de trabajo y proyección de una manera internacional, ya que son miembros de la ITA y sus respectivos congéneres del YMG, "Young Member Group", donde se reúnen los ingenieros jóvenes de las diferentes asociaciones internacionales, teniendo la oportunidad de intercambiar experiencias y abrirse a un nuevo mercado de profesionistas con alcance mundial. Cabe mencionar que esto ya está sucediendo con algunos de estos egresados de la Maestría.

También se tuvo a bien recordar en las Asambleas de manera específica la lista de los diferentes cursos, seminarios y simposios que se lograron desarrollar durante el ejercicio en los casi tres últimos años. Se desarrollaron estos eventos en Acapulco, Guadalajara y Toluca teniendo difusión en diversas universidades y entidades de la industria y del gobierno, abriendo los conocimientos en túneles.

Fue para la xv Mesa Directiva un orgullo el poder representar a México con la bandera de AMITOS en los diversos congresos, simposios y desde luego en los Congresos Mundiales de ITA, dando a conocer de manera directa las actividades desarrolladas en México por nuestra Asociación y habiendo dado como resultado el ser merecedores a la medalla a la mejor Asociación y más activa frente a 75 países miembro de la ITA.

También, fue de suma importancia la presencia de AMITOS en los Congresos Internacionales de diferentes países de América como Brasil, Costa Rica, Colombia, EEUU, incluyendo los Congresos Mundiales de la ITA en San Francisco, EEUU; Bergen, Noruega; y Dubái, Emiratos Árabes Unidos.

Vale la pena resaltar que a través de estos contactos, el Maestro Fermín Sánchez logró ser incluido en la lista de profesores acreditados por la ITA para poder dar clases en las diferentes agrupaciones especializadas en túneles mundialmente.

Se participó activamente en el Congreso Nacional de Ingeniería Civil, organizado por el Colegio Nacional de Ingenieros Civiles trayendo a dos eminencias internacionales expertos en Túneles y Obras Subterráneas: al presidente de la ITA, el Dr. Tarcisio Celestino y al Presidente del comité especializado de la ITA en la promoción del Espacio Subterráneo ITACUS, el Dr. Han Admiraal, dando excelentes ponencias al frente de muchos ingenieros interesados en el tema.

Particularmente, se informó a los asistentes en las Asambleas mencionadas, de los eventos más importantes en el marco del último Congreso Mundial WTC 2018, en Dubái, que corresponden al haber obtenido la Certificación por parte de ITA e ITA-CET de la Maestría impartida por AMITOS en la UNAM y el haber comunicado a la Asamblea General frente a los 75 países miembro de la ITA, que México solicitaría formalmente la candidatura para obtener la sede para el Congreso Mundial de Túneles en el año 2022, habiendo una importante aceptación de diversos países con los que se ha tenido contacto directo.

Desde luego, también informó ampliamente sobre los resultados financieros de la Asociación por parte de nuestro tesorero Ing. Alfredo Sánchez Gómez, resaltando dos importantes circunstancias, el que se está controlando la tesorería por un nuevo despacho y ya se busca la re-obtención de que la Asociación sea Donataria, después de haberla perdido y la otra es que los depósitos en cuenta fija no se tocaron y se logró un buen superávit aún después de haber pasado años austeros por parte del gobierno de México en turno.

Dentro de la Asamblea Extraordinaria, se votó a favor de la modificación de los estatutos en el sentido de poder incluir un socio temporal con el que se realicen diferentes eventos donde existan ingresos y que se puedan distribuir utilidades sin causar impuestos dobles o tener que facturar entre asociaciones cantidades importantes que determinen dicha utilidad.

Dentro de los puntos tratados en la asamblea extraordinaria se puso a votación la posible inclusión de una nueva Vicepresidencia en la Mesa Directiva, denominada de manera enunciativa únicamente "Microtuneleo", ya que la extensión y alcance de ésta es desde luego mucho más grande e importante que los indicado por solo este nombre.

Una vez explicada la necesidad de que Amitos contara con este alcance y tras analizar las diferentes asociaciones en el mundo donde se conjugan estas amplias tecnologías y diferentes sistemas de excavación, reparación de tuberías y conductos de menor diámetro, se votó a favor de que nuestra asociación contara con esta vicepresidencia que tendrá a su cargo una gran labor y mucho trabajo para informar y traer esas experiencia a nuestros asociados.

Como informe final de los eventos realizados, se llevó a cabo la votación de la XVI Mesa Directiva con los siguientes integrantes a quienes les damos la más cordial bienvenida.

XIV Consejo Directivo

M.I. Fermín A. Sánchez Reyes
Presidente

Ing. Leonardo Guzmán León
Secretario

Ing. Mario A. Torres Reyes
Tesorero

Ing. Jorge Armando Rábago Martín
Vicepresidente de Comités Técnicos

M.I. Carlos A. Ramírez de Arellano de la Peña
Vicepresidente de Cursos y Congresos

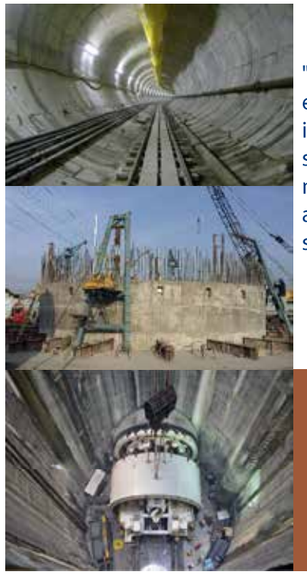
Ing. José Anselmo Pérez Reyes
Vicepresidente de Conferencias y Publicaciones

Arq. Carlos F. Frutos Garmendia
Vicepresidente de Banco de Datos, Biblioteca y Revista

M.I. Jorge López Molina
Vicepresidente de Grupo de Ingenieros Jóvenes

TIDESA
Túneles, Instrumentación y Diseño Especializado S.A. de C.V.

Somos una empresa mexicana, especializada en análisis y diseño de obras subterráneas y túneles



"Nuestro principal objetivo es enfocarnos en el desarrollo de ingeniería de valor para satisfacer las necesidades de nuestros Clientes con la aplicación de soluciones sustentables e innovadoras".

Visita nuestra página web:
www.tidesa.mx
Solicita más información:
contacto@tidesa.mx
Telefono: (52) 55 76779004
twitter: @tidesa0

NOTICIAS

Conclusión del Túnel **Canal General**

La obra del túnel Canal General (localizada en la zona de Valle de Chalco para derivar en la zona de Ixtapaluca) está concluida. Los trabajos consistieron en la construcción de cuatro lumbreras de 12 metros de diámetro (cada una), con una profundidad promedio de 23 metros (muro Milán); la fabricación de 5,334 anillos de dovelas de concreto reforzado; la excavación de 7.8 km de túnel y la colocación de 40,000 m^3 de concreto reforzado para conformar el revestimiento definitivo y lograr los 5 m de diámetro terminado que marca el proyecto. Asimismo, entre las lumbreras 1 y 3 se construyeron siete captaciones, a través del túnel, para el desalojo de las aguas pluviales y de drenaje de la zona.

Para lograr la mejor operación del sistema hidráulico municipal, se equiparon las captaciones con estructuras de control adosadas a los cárcamos de las plantas de bombeo existentes a lo largo del Canal General, y se habilitó el túnel con una compuerta tipo bidireccional que se instaló en la lumbrera 4; mismas que cumplirán la función de evitar el desalojo del agua a través del Canal General, para realizar descarga por gravedad al interior del túnel. Con estos trabajos, se logrará controlar el paso del agua al interior del túnel para mantenimiento o manejo de las aguas pluviales y de drenaje, así como asegurar que no se presenten inundaciones en la zona.

Túnel para trasladar a los visitantes de Qatar

desde el aeropuerto hasta el centro histórico, para la Copa del Mundo FIFA 2022

¡Los aficionados de fútbol que visitarán Doha para la Copa del Mundo FIFA 2022 utilizarán un nuevo túnel! Se diseñan y construyen 13,8 km de túnel con dos tubos para trasladar a los visitantes de Qatar desde el aeropuerto al centro histórico de la capital. El contrato incluye también seis estaciones subterráneas, 51 interconexiones de seguridad entre tubos, así como tres pozos de evacuación de emergencia.

Túnel ferroviario Hallandsås, Suecia

Es un túnel ferroviario que conecta la cara norte con el lado meridional de la cordillera Hallandsås. Es utilizado por la línea de la costa oeste, en el tramo comprendido entre Angelholm y Halmstad, en el suroeste de Suecia. Ha servido para mejorar la conexión entre las ciudades de Gotemburgo (Suecia) y Copenhague (Dinamarca).

Era un proyecto que proyectaba 10 años para perforar la Hallandsås, montaña situada sobre una falla geológica que planteó muchos problemas a numerosos gobiernos suecos desde los años 70. Con el fin de mejorar las comunicaciones ferroviarias entre Malmoe y Goteborg, era necesario atravesar esta montaña para el proyecto de apertura territorial del oeste de Suecia. Los dos túneles paralelos de casi 8,5 km cada uno, inaugurados el 8 de diciembre de 2015, permiten que ahora circulen 24 trenes por hora, en lugar de los cuatro que pasaban por la antigua vía que rodeaba la montaña; se ha duplicado también la capacidad de los trenes de mercancías.

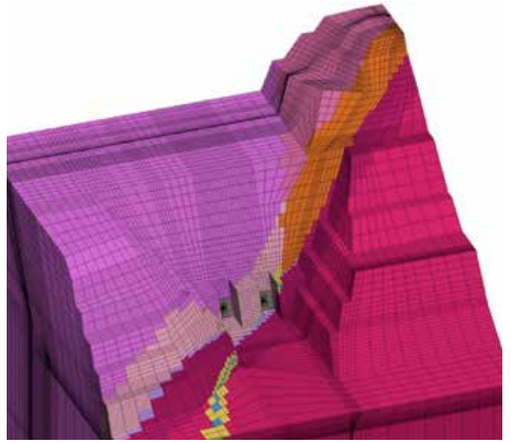
Información proporcionada por VINCI Construcción.

13 Bares de presión hidráulica

Es la presión que podía soportar la sección cortadora de la tuneladora Åsa, esto es, tres o cuatro veces más que en unas obras normales.

400 litros de agua por segundo

Es el equivalente del consumo de agua de una ciudad de 100 000 habitantes y es también la cantidad de agua que puede descargar la montaña a la altura de la falla Mölleback. Para pasar, hubo que congelar este terreno en un tramo de 135 m para el primer tubo y de 230 m para el segundo.



¿Modelizar o modelar?

Por Fermín Sánchez.

Real Academia Española:

Modelar:

1. Formar de cera, barro u otra materia blanda una figura o adorno.
2. Configurar o conformar algo no material.
3. Presentar con exactitud el relieve de las figuras.
4. Exhibir en una pasarela o en una sesión fotográfica diseños de moda

Modelizar:
Construir el modelo o esquema teórico de algo

Diccionario Oxford:

Modelar:

1. Dar la forma deseada a un material blando, como por ejemplo cera, barro o plastilina, para hacer una figura
2. Hacer cambios en algo no material, especialmente en la forma de ser de una persona, para conseguir que adquiera o desarrolle determinados rasgos

Modelizar:
Establecer el modelo [de algo]: el lenguaje matemático permite describir y modelizar sistemas.

Consultas lingüísticas en la página de la RAE:

Sobre el sustantivo modelo se ha creado, como tecnicismo propio del ámbito de diversas ciencias, el verbo modelizar, que se emplea con el significado de 'establecer un modelo teórico de algo': «Las operaciones elementales que ayudan a conceptualizar y modelizar ocupan un lugar central en el currículo matemático y se desarrollan a lo largo de un gran período de tiempo» (J. Martínez Montero Una nueva didáctica del cálculo para el siglo XXI [Esp. 2000]); «Desde una perspectiva básicamente neurológica se puede modelizar el cerebro como un sistema compuesto por neuronas (J.Ezquerdo Teorías de la arquitectura de lo mental» [Esp. 1995]). Para expresar la 'acción y efecto de modelizar', se usa el sustantivo derivado modelización: «Se viene utilizando la modelización matemática para representar el conocimiento del desarrollo científico en un sector durante un periodo de tiempo» (S. Ríos La matemática española en el siglo XX [Esp. 1991]).
En inglés existen to model y to modelize, que el Diccionario de Oxford define como 'construir o dar forma a algo siguiendo un modelo' y también 'crear o establecer un modelo'. El español disponía ya de otras voces emparentadas con modelo: el verbo modelar y el sustantivo, modelado. Pero estos términos están fuertemente vinculados al mundo de las artes plásticas, por lo que los especialistas han preferido crear otros derivados de modelo morfológicamente posibles, como modelizar y modelización.

Artículo "Modelización y simulación de sistemas complejos"

Antonio Caselles Moncho,
Publicaciones de la Universitat de València, 2008

Modelizar un sistema comienza por identificar sus elementos y las relaciones entre ellos. La modelización se dice "multifacética" o "perspectivista, (Zeigler, 1984) porque el modelo que se construya de un sistema real depende del objetivo del modelizador. El grado de detalle en la descripción también depende de este objetivo.

Artículo "Metodologías de modelización"

Rodolfo Fernández Gonzalez
www.ucm.es/info/pslogica/modelos.pdf

La construcción de hipótesis o modelos computacionales es un "arte" sometido a reglas.
Modelizar: formalizar un fenómeno natural, organizacional o técnico para disponer de:

- Una descripción rigurosa
- Un punto de partida preciso para la contrastación de hipótesis.
- Núcleo para el desarrollo de una aplicación informática.

RELACIONES CON LA ITA

Grupo de Trabajo de la ITA GW5 Health and Safety

Lineamientos para la colocación de cámaras de refugio en túneles en construcción

ITA REPORT n°014 - V2 / MARCH 2018

Este documento documenta los requisitos para las cámaras en diferentes países y jurisdicciones, para generar un criterio aplicable internacionalmente. Las cámaras de refugio también se utilizan en la minería, por lo que también aplican en este ramo.

Los lineamientos aplican a la colocación de cámaras de refugio en túneles mecanizados y convencionales en construcción. Asimismo, están destinados a ser utilizados por autoridades, clientes, diseñadores, contratistas, coordinadores de seguridad del sitio, aseguradoras y cualquier persona involucrada en la construcción de un túnel. Criterios similares podrían aplicarse al evaluar la colocación de cámaras de refugio en túneles que se están renovando.

Puede consultar el documento completo en el sitio de ITA, en la siguiente dirección:
https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/content/10/working-group-5-health-and-safety-in-works

Anúnciate con nosotros

Aportación por publicidad*

Cuarta de forros
(última página)
$14,024.00

2da y 3era de forros
$12,855.00

Página central
$14,024.00

Página interior
$ 11,687.00

1/4 de página
$3,506.00

Media página
$6,428.00

Cintillo
(4 cm)
$1,753.00

* Agregar a estas cuotas de recuperación el I.V.A. y el pago deberá efectuarse por anticipado.

Cuotas sujetas a cambio con previo aviso.

La cuota no incluye diseño y/o corrección de estilo, sólo se harán adecuaciones mínimas.

Se recibirán imágenes con formato jpg, tiff, ai, png o psd de alta resolución (300 dpi o superior) por correo electrónico o CD y con prueba de color BEST COLOR.

Ciudad de México a 24 de Agosto de 2018

C O N V O C A T O R I A

Con base en lo señalado en la Ley Reglamentaria del Artículo 5º. Constitucional y a fin de formar la lista de **PERITOS PROFESIONALES CERTIFICADOS EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS,** por el Colegio de Ingenieros Civiles de México, para el año **2018**, se invita a los Ingenieros Civiles aspirantes a formar parte de la lista mencionada, que será registrada ante la Dirección General de Profesiones de la Secretaría de Educación Pública a presentar su solicitud a más tardar el **19 de Octubre del 2018** a las **15:00** horas anexando la siguiente documentación:

- Solicitud escrita dirigida al Coordinador del Consejo de Certificación, en que se manifieste tanto el deseo de obtener la certificación como Perito Profesional Certificado en Túneles y Obras Subterráneas, así como la aceptación del procedimiento de evaluación para obtenerla.
- Comunicación dirigida al Coordinador del Consejo de Certificación en la que exponga las razones por las que desea obtener dicha certificación.
- Copia fotostática del título profesional y en su caso, del título de maestría o doctorado.
- Copia fotostática de la cédula profesional.
- Curriculum Vitae actualizado en las formas que proporcionará el Colegio.
- Constancia de su carácter de miembro del Colegio indicando que se encuentra al corriente de sus cuotas.
- Constancias o documentos que demuestren que cuenta con la experiencia y tiempo de práctica que se mencionan en el Reglamento Complementario para Designación de Peritos Profesionales en Túneles y Obras Subterráneas.
- Copia de tres estudios o trabajos relacionados con los túneles y obras subterráneas en los que haya participado.
- Copias fotostáticas de diplomas, distinciones o reconocimientos, relacionados con la especialidad.
- Perfil de actividad profesional en túneles y obras subterráneas en las formas proporcionadas por el Colegio.
- Copia del recibo de pago para estudio de la solicitud.

El interesado deberá solicitar la carpeta digital en la que se indican con todo detalle los requisitos que debe satisfacer, al área de Certificación Profesional, en el correo electrónico: certificación@cicm.org.mx o al teléfono 56 06 23 23 ext. 122 con el Ing. Leobardo Palomino o la Lic. Liliana Arriaga

El interesado podrá consultar previamente la carpeta y posteriormente entregarla con toda la documentación al área de Certificación Profesional, en el local del Colegio, ubicado en Camino Santa Teresa No. 187, Col. Parques del Pedregal, Delegación Tlalpan, D. F.

A T E N T A M E N T E

ING. ASCENSIÓN MEDINA NIEVES
PRESIDENTE
XXXVII CONSEJO DIRECTIVO

CONSTRUCTORA ESTRELLA, S.A. DE C.V.

TÚNEL EN ROCA SUAVE

EXCAVACIÓN CON MÁQUINA TUNELADORA

TÚNEL CONDUCCIÓN EN ROCA, PRESA EL GALLO

Constructora Estrella, S.A. de C.V., empresa 100% mexicana, con una trayectoria de más de 60 años contribuyendo al desarrollo del país, participa en la construcción de Proyectos de muchos tipos, tanto en las ciudades como en el campo, apoyando al crecimiento de la infraestructura.

Es la empresa con mayor antigüedad en la construcción de obra subterránea en la Ciudad de México, pionera al habilitar el primer escudo de frente de rejillas para excavar en arcillas blandas, colectores de 4 metros de diámetro a 15 metros de profundidad. Con visión para el desarrollo de nuevas tecnologías, empleadas en la construcción de obras subterráneas, que a la fecha se siguen empleando con un alto grado de efectividad, ha participado en muchos proyectos.

Actualmente, es integrante del grupo encargado de la construcción del Túnel Emisor Oriente.

MICROTUNELEO

REPARACIÓN DRENAJE PROFUNDO

REVESTIMIENTO DRENAJE PROFUNDO

LUMBRERAS FLOTADAS

RIO MIXCOAC No. 30, MEXICO D.F. TEL. 52-00-22-70 cesaw@prodigy.net.mx