

¿QUO VADIS INGENIERÍA DE TÚNELES? PREDICIENDO LO IMPREDECIBLE

CONFERENCIA DE CLAUSURA IMPARTIDA POR EL PROFESOR Z. T. RICHARD BIENIAWSKI EN EL CONGRESO MUNDIAL DE TÚNELES



Estoy muy agradecido de que Ingeopres, publicación que estimo mucho y que disfruto leyendo cada mes, tanto para estar al día en el campo de los túneles como para practicar mi español, haya decidido incluir mi conferencia de clausura pronunciada el año pasado en el Congreso Mundial de Túneles en Brasil, y agradezco a los editores por su amable gesto. Aunque ha pasado cierto tiempo desde entonces y la tecnología cambia diariamente creo que mi mensaje es aún muy apropiado a los lectores que hoy en día dedican su vida profesional al mundo de los túneles y desearían escuchar mis reflexiones sobre las lecciones aprendidas a lo largo de mis cincuenta años de carrera. Este artículo y mi conferencia original no sería 'posible' de no ser por el Catedrático Benjamín Celada, Presidente y Director General de Geocontrol, por sufragar mi estancia en Brasil y por los muchos años de cooperación en numerosos proyectos en España y Latinoamérica. Valoro mucho, y siempre recordaré con gratitud, su experiencia y conocimientos en el campo de los túneles así como su amistad y generosidad al visitar España. También desearía agradecer a la Directora Corporativa de Control y Desarrollo de Negocio, Laura Celada, por su dedicación e inmensa ayuda en muchos aspectos pero especialmente por colaborar en hacer realidad la publicación de este artículo en Ingeopres. Finalmente, aunque el pasado año me retiré de la participación activa en el ámbito de los túneles, sigo interesado por el futuro de los túneles en España y en otras partes y desearía aprovechar esta oportunidad para desear a los lectores de Ingeopres y a los profesionales y staff de Geocontrol todos los éxitos durante su trayectoria. Con estas palabras, me gustaría volver a mi conferencia, según se impartió en Brasil el 14 de mayo de 2014.

Es un gran honor para mí visitar Brasil por segunda vez y, en esta ocasión, agradezco al presidente del Comité Brasileño Hugo Rocha y al director del Congreso Tarcísio Barreto Celestino, su amable invitación para impartir esta conferencia de clausura; un honor, que realmente aprecio.

Hoy soy un privilegiado por ver Brasil bajo el lema de este Congreso: 'Túneles para una vida mejor', y mi función ahora es evaluar si la misión de todos los que estamos aquí, organizadores, autores, participantes y expositores, se ha cumplido en términos de dicho lema, así como identificar qué direcciones significativas de desarrollo podríamos esperar en el futuro.

La conferencia inaugural, dedicada a Sir Alan Muir Wood, ha sido de gran ayuda para escribir mi conferencia.

Tuve el honor de conocer personalmente a Sir Alan Muir Wood pues coincidimos en numerosas ocasiones en Sudáfrica trabajando en el túnel hidráulico de 80 km de Orange Fish, y también durante su mandato como primer presidente y fundador de la International Tunnelling Association. Nos hicimos amigos, aun cuando fue mi superior durante quince años, y mantuvimos el contacto mientras fui vicepresidente de la recién creada SANCOT (South African National Committee on Tunnelling). ¡Durante bastantes horas que pasamos en común Sir Alan compartió conmigo sus puntos de vista sobre lo que uno debería esperar al asistir a un *World Tunnel Congress*! Bien, ¿han pensado en ello? Él, un consumado ingeniero y líder, pero también con un gran sentido del humor fruto de su herencia escocesa, me dijo: "Con tantos congresos, coloquios y simposios teniendo lugar cada año, sólo pido a aquellos que envío a los mismos lo siguiente: "¡¡tráeme simplemente una y sólo una buena idea que pueda usar y pagaré todos tus gastos del viaje añadiendo una botella de vino!"

Me gustó tanto que –hoy– he seleccionado tres tópicos o áreas de ingeniería de túneles, de las que analizaré algunas ideas de cada una y cómo éstas se relacionan con la temática de este Congreso. Por esta razón, he incluido estas tres áreas bajo el título en negrita: '¿Quo Vadis Ingeniería de Túneles? Prediciendo lo impredecible'. A propósito, la

expresión 'Quo Vadis' es una expresión latina famosa que significa '¿Adónde vas?' empleada para indicar un destino futuro y que también fue usada en el libro del Premio Nobel polaco **Henryk Sienkiewicz** (1895).

Para los que estamos aquí, para responder nuestro *Quo Vadis*, repito esta predicción: **"Los analfabetos del siglo XXI no serán aquellos que no puedan leer ni escribir sino aquellos que no puedan aprender, desaprender y volver a aprender"**. Alvin Toffler, futurista. Este mensaje será un marco para mi Conferencia de Clausura.

Los tópicos que he seleccionado para su consideración son:

1. Metodologías de diseño de túneles.
2. Formación para los nuevos equipos de Ingenieros de Túneles y Planificadores.
3. Costos de investigación geotécnica necesarios para un correcto diseño y construcción de túneles.

Inmediatamente podrían Uds. preguntar: "¿Por qué prediciendo lo impredecible? ¿Es razonable y posible hacer todo completamente previsible a lo largo de la vida?" La respuesta es: "¡Totalmente!" Y ya se ha hecho anteriormente a una escala aún mayor.

En el libro: *'Los próximos 500 años – La vida en el próximo milenio'*, escrito por Adrian Barry, se sostiene que hay una regla para predecir el futuro; en concreto, que los eventos sólo parecen extraordinarios en el momento en que se predicen, nunca después de ser una realidad. Así pues, el presente nos parece 'ordinario' y el futuro se muestra 'fantástico'. Pero el presente fue una vez futuro de alguien y el futuro será el presente de otro. Así, cuando Brasil fue descubierto, la gente se maravilló, pero hoy se ve como un excitante e interesante lugar donde viven millones de personas.

Si están algo confundidos, lean el libro: *'Los próximos 50 años de la ISRM y progreso futuro previsto en Mecánica de Rocas'* escrito por John Hudson, presidente (2007-2011) de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas. El autor señaló que Hipócrates, el físico griego (460-377 a. C.), utilizaba un método para predecir el futuro que se resume así: **"Observa el pasado, diagnostica el presente, predice el futuro"**.

Basándonos en lo que se ha conseguido en el pasado y sabiendo cuál es el estado actual del arte, vamos a identificar, en base a los tres tópicos que mencioné anteriormente, cuáles son los principales problemas que necesitan ser resueltos en el futuro.

Hudson considera que predecir el futuro no sólo es posible sino también interesante, "porque en-globa cuestiones relevantes relacionadas con la naturaleza de la comunidad de Ingeniería de Rocas, almacenamiento y difusión del conocimiento y el impacto del aumento del poder de la informática". A esto, por mi parte, añadiría el impacto en la sociedad y en el medio ambiente de la influencia positiva del uso de túneles – el lema de nuestro Congreso.



Metodologías emergentes y principios del diseño de túneles

"No son las cosas que desconocemos las que nos causan problemas, sino las cosas que creemos conocer bien".

General Dwight Eisenhower.

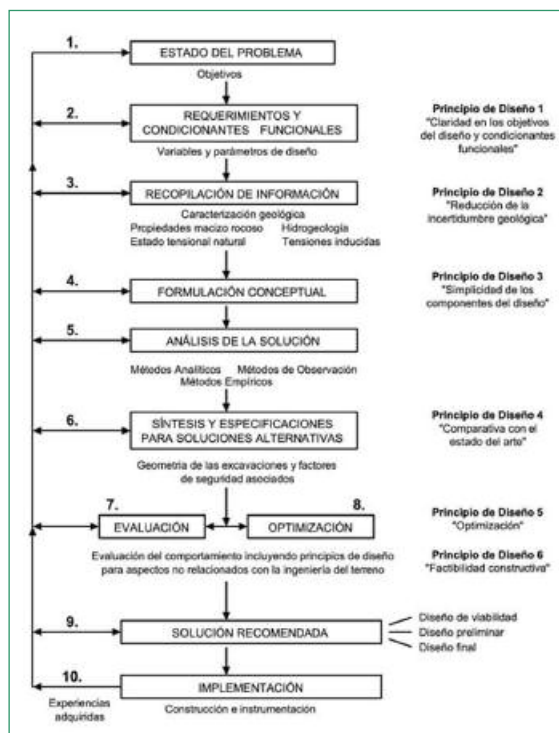
Sí, esta cita es para recordarnos que todos estamos bastante seguros de cómo diseñar túneles, pero deberíamos tener siempre la mente abierta a nuevas ideas. A este respecto, el fundador de nuestra ITA, Sir Alan Muir Wood, insistía en la importancia de aplicar principios científicos en el diseño ingenieril. Esto se enfatizó en su libro *'Tunnelling: Management by Design'* publicado en 2002. Este Congreso ha tenido numerosas buenas presentaciones relacionadas con la temática del Diseño de Túneles y parece que cada Ingeniero de Túnel tiene su propia forma de diseñar. De hecho, la ITA tenía un Grupo de Trabajo dedicado a este tema y la ISRM otro similar.

El diseño de los túneles se ha tratado extensamente en varios manuales a lo largo de los años por diferentes autores: *'Diseño de Mecánica de Rocas en Minería y Túneles'* (1984) y *'Metodología de Diseño en Ingeniería de Rocas'* (1992). Recientemente, Xia-Ting Feng y John A. Hudson han publicado su libro *'Diseño en Ingeniería de Rocas'* (2011).

Estos últimos libros señalan que la metodología del diseño "está experimentando actualmente y continuará experimentando gran desarrollo en el futuro; debido a las nuevas capacidades provistas por el uso de programas informáticos que pueden representar el comportamiento de las rocas de forma más precisa".

Con este espíritu, propuse hace dos décadas una Metodología de Sistemas de Diseño para Ingeniería de Rocas (Bieniawski 1992) que está ilustrada en la Figura 1. Posteriormente Feng y Hudson la emplearon como base para un enfoque modificado. Al mismo tiempo, en este Congreso y en la Conferencia de Excavación Rápida y Túneles que tuvo lugar en 2013, un número considerable de artículos que describían importantes proyectos de túneles no describía de forma específica ninguna metodología de diseño de túneles utilizada o, si acaso, sólo presentaba una mención superficial. Una de las razones por

Figura 1: Metodología de Sistemas de Diseño para Ingeniería de Rocas, incluyendo el uso de los principios de Diseño (Bieniawski 1992).



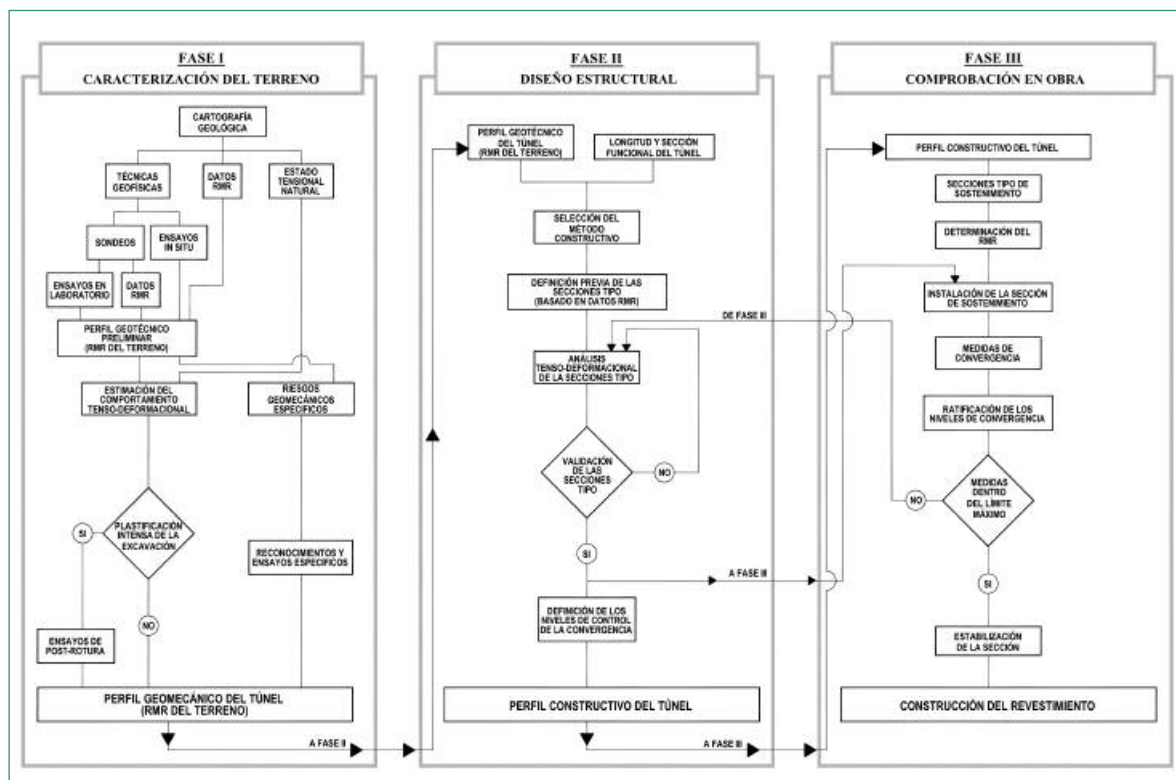
las cuales ocurre esto es que ni la Propiedad/Gestor ni las Agencias Gubernamentales requieren la divulgación de un procedimiento estándar de diseño porque no existe, a excepción de la Unión Europea que ha editado el **Eurocódigo 7 de Diseño Geotécnico**, y que permite numerosas excepciones. El propósito de los Eurocódigos es el de **unificar la meto-**

dología de diseño. Sustituyen a los existentes 27 códigos de construcción nacionales en Europa por un único código de construcción que abarca la Unión Europea en su totalidad. En total, consta de 58 partes y 5.500 páginas. **El Eurocódigo 7 define el diseño de las 'geoestructuras'**. Los principios y metodologías de diseño se unifican pero las condiciones específicas adicionales variables (tales como resistencia del macizo y campo de tensiones predominantes) se tienen en consideración mediante Anejos Nacionales (NADs). Muchos países carecen de un Anejo Nacional apto para Ingeniería de Rocas, pero el Reino Unido ha creado uno. Los Eurocódigos no exponen de forma explícita cómo diseñar excavaciones en roca pero sí definen los requerimientos mínimos para el diseño.

Creo que la necesidad de disponer de metodologías unificadas será más pronunciada en tanto que el debate sobre el almacenamiento subterráneo de residuos nucleares, una cuestión política sensible, se abra camino demandando principios y metodologías verificables para el diseño de túneles, tal y como se hizo en EE UU durante el programa de selección en el Emplazamiento de Almacenamiento de Residuos Nucleares de Yucca Mountain.

Entretanto, un compromiso factible ha emergido con el enfoque presentado en España por el Dr. Celada y su equipo, introduciendo el concepto del DEA (Diseño Estructural Activo), traducido al inglés como '*Interactive Tunnel Design Methodology*'. El DEA se ilustra en los tres gráficos de la figura 2 en la cual se puede ver cuáles son las tres fases que lo conforman: Caracterización del terreno, Diseño Estructural y Comprobación en Obra. Los detalles y ventajas del mismo se analizan en otros textos (Celada, 2011).

Figura 2: Diseño estructural activo (DEA), Celada 2011.



Las ventajas del concepto de Diseño Estructural Activo (DEA) como metodología para el diseño de túneles son:

1. **Aumento de la seguridad** durante la construcción debido a que las deformaciones del túnel se confirman con los análisis tensodeformacionales; que validan cada tipo de sostenimiento;
2. **Oportunidad para comparar los cálculos analíticos con las deformaciones medidas** y por consiguiente proporcionando valores fiables de la convergencia, lo que refleja el comportamiento del macizo; y
3. Minimización de la instrumentación en el túnel porque el control del comportamiento del macizo rocoso se basa solamente en las **medidas de convergencia**.

Considerando diferentes metodologías de diseño, podemos beneficiarnos mucho del intercambio de ideas derivadas de la interacción entre los campos de la Ingeniería Minera y Civil. Esto es importante porque he observado que no es frecuente que los Ingenieros Civiles estén estrechamente relacionados con la tecnología minera y viceversa. De hecho, tuve la fortuna de estar involucrado por igual en ambas disciplinas y aprender que hay muchas consideraciones prácticas que son diferentes cuando se diseñan túneles en minería y en obra civil. Nuestro fundador Sir Alan Muir Wood (1979) pensaba que estas diferencias en la práctica se debían a diferentes tradiciones, a diferentes estándares de aceptabilidad y también a diferentes regulaciones. Sin embargo, en mi opinión hay alguna serie de diferencias esenciales en el diseño de túneles para la minería y para la obra civil:

1. La mayoría de los túneles civiles son prácticamente permanentes (por ejemplo, ferrocarriles subterráneos, túneles hidráulicos) mientras que los túneles mineros son temporales, aunque, por supuesto, algunos túneles mineros pueden tener una vida útil de bastantes décadas;
2. Los túneles civiles dan servicio a la sociedad en general en tanto que los túneles mineros son empleados sólo por mineros profesionales;
3. La longitud total de túneles mineros excede muchas veces la longitud total de túneles excavados con propósitos civiles y no es sorprendente, por tanto, que se utilicen en la Ingeniería Civil estándares más exigentes que en la ingeniería minera (por ejemplo en la exploración geotécnica, excavación, sostenimiento, etc.);
4. Las condiciones del terreno en minería se conocen mejor gracias a las actividades mineras durante numerosos años; en tanto que las estructuras de ingeniería civil se ubican habitualmente en terrenos que precisan una investigación geotécnica detallada;
5. Las estructuras de Ingeniería Civil se ubican generalmente a poca profundidad (menos de 500 m) sin considerar la influencia del campo de tensiones y en base a modelos geológicos imprecisos que no pueden dar la importancia debida al efecto dominante que los factores geológicos tienen en Ingeniería Civil – en minería el campo de tensiones es de capital importancia;
6. Puesto que la minería es un proceso dinámico, las excavaciones mineras están sujetas a campos de tensiones variables y esto precisa refuerzos del macizo diferentes a

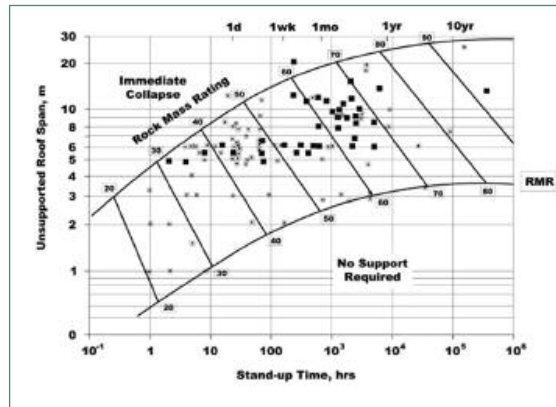


Figura 3: Tiempo de estabilidad de túneles construidos con perforación y voladura en función del RMR (Bieniawski 1989). Los cuadrados negros corresponden a casos mineros.

los de un campo de tensiones estático – los túneles civiles, en general, no experimentan cambios en el campo de tensiones;

7. La minería persigue incrementar los beneficios económicos y las inversiones están más restringidas para las investigaciones en fase de diseño que en el caso de la Ingeniería Civil; y
8. Los emplazamientos de las obras civiles son a menudo elegidos en base a sus mejores condiciones, en tanto que en la minería la localización del mineral impone el emplazamiento.

El área particular donde la minería ha realizado un progreso más significativo concierne a la máxima extracción de mineral o carbón compatible con criterios aceptables de estabilidad. De este modo el historial de túneles mineros mostrado en la Figura 3 fue relevante al compilar datos del tiempo de estabilidad para excavaciones subterráneas sin sostenimiento, hace varias décadas.

Me gustaría que, bajo el espíritu de la recomendación de Sir Alan Muir Wood, tomen nota de esta “idea para reflexionar #1” que debemos llevar a cabo: **“Ser concretos a la hora de describir la metodología de diseño para un túnel y emplearla como una lista de comprobación (similar a lo que hace un piloto antes del despegue) para asegurar que se están teniendo en cuenta todos los condicionantes del proyecto”.**

Formando Ingenieros de túneles y educando a la propiedad y planificadores

“Cada profesión moderna orgullosa de sí misma requiere tres elementos: Teoría, Educación y Práctica. La razón: se necesitan para garantizar su capacidad de renovarse y desarrollarse.” Herbert Simon, filósofo (1969).

En relación a la cita superior, la profesión de **Ingeniero de Túneles**, debería estar orgullosa de sí misma por tener en su **teoría** a la Mecánica de Rocas y por tener una excelente **práctica** en numerosos y magníficos túneles, que se remontan desde los tiempos del Rey Hezekiah (700 a.C.), cuyo túnel se menciona en la Biblia (Reyes 2; 20:20), hasta hoy en día.

Pero, ¿qué ocurre con la **educación**? Es decir, ¿qué ocurre con los nuevos equipos de Ingenieros de Túneles e Ingenieros Geólogos así como con la formación de los Planificadores no Técnicos y Gestores que controlan los presupuestos de nuestros proyectos?

Los organizadores brasileños de este Congreso nos han obsequiado a todos con un desafío a la par que con un objetivo para esta reunión, en las maravillosas Cataratas de Iguazú. Definiendo el eslogan *'Túneles para una vida mejor'* manifiestan en la introducción del Programa: ***"El WTC 2014 llega en un momento importante de desarrollo de los países sudamericanos... los túneles pueden proporcionar una vida mejor a la población... Brasil y Latinoamérica tienen la oportunidad de probar que esto es posible... la comunidad técnica debe mostrar a las autoridades las aplicaciones que los túneles pueden tener y cómo pueden mejorar la calidad de vida de la población... y expandir la cultura de los túneles"***.

¿Hemos comenzado en este Congreso a lograr estos objetivos y qué es lo que debemos hacer a continuación? Efectivamente, se han publicado varios artículos valiosos (véase la Bibliografía) que nos muestran la importancia que tienen los túneles en nuestras vidas, ya que a la vez que preservan la preciada superficie permiten al mismo tiempo el disfrute de ocio, trabajo y calidad de vida.

Pero es cierto que actualmente existen dos desafíos pendientes: (i) la formación de los Ingenieros de Túneles e Ingenieros Geólogos a través de programas profesionales específicos y (ii) continuar la formación que actualmente falta en la mayoría de las Escuelas Técnicas Universitarias, no sólo en Sudamérica sino también en los países desarrollados de Europa y Norteamérica. Puedo hablar desde mi propia experiencia al haber enseñado en EE UU, en España, en Gran Bretaña y en Polonia; el hecho es que, con algunas excepciones, hay pocos programas profesionales dedicados a Ingeniería de Túneles pues las universidades forcejean y compiten por las asignaciones de materias. Lo que sí existen son amplios programas de Ingeniería Civil e Ingeniería Minera pero no para especialistas en Ingeniería de Túneles.

Para ser más concreto, un reciente estudio (2010) sobre *'Educación en Ciencia e Ingeniería Subterránea'* de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, expuso sus hallazgos de la siguiente forma: ***"La situación actual es que la educación de postgrado en Ingeniería de Rocas no tiene una amplia base de apoyo entre las instituciones de formación superior. Por ejemplo, entre aproximadamente los 200 Departamentos de Ingeniería Civil estudiados, menos del 10% tenían programas sustanciales de Postgrado en Mecánica de Rocas; pues aquellos con Programas Geotécnicos están principalmente orientados a la Mecánica de Suelos. La mayoría de las Universidades con Departamentos de Minería imparten Mecánica de Rocas pero son inferiores en número y sus departamentos tienden a ser pequeños"***.

En esencia, la formación en Ingeniería de Rocas no se ha establecido bien en las Universidades y las cifras tanto de estudiantes como de profesores podrían estar disminuyendo. Lo que podría devenir es una necesidad acentuada

de educación debido a crecientes necesidades en las industrias de la minería y el petróleo, que por su parte podría llevar a un interés renovado por la Ingeniería de Rocas.

Sin embargo, en este Congreso ha tenido lugar una excelente iniciativa a través de la celebración previa a este Congreso de un curso de formación sobre túneles hidráulicos. Sus 16 horas de clases, impartidas por profesionales, buscaban aumentar la educación y formación de estudiantes graduados y jóvenes profesionales.

Además, no hay que olvidar la **guía de educación en el ámbito de los túneles** que se publicó en la revista *Tunnels & Tunnelling*, Junio 2010 (p. 32) en la cual se relacionaban:

1. Máster en 'Tunneling and Underground Space', en la Universidad de Warwick en Inglaterra; duración: 12 meses, tasa de matrícula: £7.050 para UE;
2. Máster en 'NATM-Engineer', conjuntamente en las Universidades de Graz y Leoben (Austria); duración: 2 años, tasa de matrícula: €16.000;
3. 'Certificate in Tunneling' Online en la Universidad de Texas (Austin); duración: 2 años, tasa de matrícula: \$15.000 USD;
4. Curso de grado Post-Máster en 'Tunnelling and TBMs' en el Politécnico de Turín (Italia); duración: 12 meses; tasa de matrícula: €5.000;
5. Máster en 'Advanced Studies in Tunnelling' en la Escuela Politécnica de Lausana (Suiza); duración: 10 meses; tasa de matrícula: CHF 18.000.

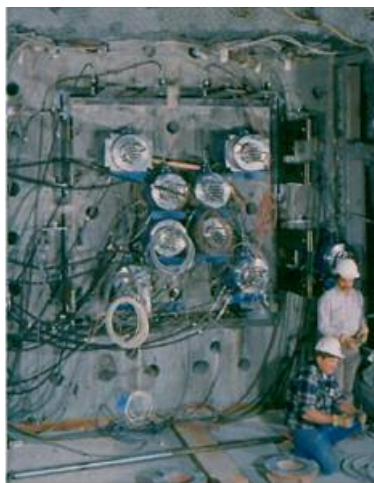
También se tienen noticias del curso de grado Máster en la **AGH** Universidad de Ciencias y Tecnología en Cracovia, Polonia, en la Escuela (Wydział) de Geoingeniería.

Todas las anteriores constituyen iniciativas muy valiosas pero son todavía excepciones a la situación de estancamiento actual en formación y educación en ingeniería de rocas.

El segundo desafío es educar a los profesionales no técnicos que se encuentran involucrados en la planificación de proyectos de túneles o que son propietarios o gestores que administran proyectos subterráneos. Estos profesionales tienen la ilusión de estar mejor informados sobre aspectos de detalle los túneles, aplicaciones y uso, así como sobre el control de costes... pero, ¿dónde deberían buscar ese tipo de formación? Creo que la Comunidad de túneles debería proveer tales oportunidades.

Así que, una vez más, bajo el espíritu de la recomendación de Sir Alan Muir Wood, por favor tomen nota de esta "idea para reflexionar #2": ***"Explorar nuevas posibilidades para mejorar la formación de los jóvenes ingenieros de túneles - hombres y, sí, mujeres -; si eres catedrático o profesor, toma la iniciativa en tu institución, si estás en el negocio de los túneles, ayuda a conseguir fondos para un nuevo curso específico; si no eres ninguno de ellos: escribe artículos en la prensa y los medios sugiriendo acciones para el beneficio de la sociedad"***.

Finalmente, para todos los que estamos en este Congreso: apoyemos el concepto de 'formación continua' para los ingenieros de túneles e ingenieros geólogos, y 'cursos cortos' para que los Planificadores no Técnicos y Gestores Públicos estén más familiarizados con nuestro campo y sus profesionales.



¿Cuándo 'suficiente' es suficientemente suficiente para la investigación geotécnica en túneles?

"No toda experiencia es necesariamente buena. Debemos aprender sólo de las mejores prácticas – aquellas de uso más generalizado en las compañías más competitivas."
John Dixon (1991).

A menudo planificamos el alcance de las investigaciones de campo en base a nuestra experiencia en proyectos similares. No obstante, la cita superior nos previene a ser cautelosos, pues no toda experiencia es necesariamente buena. Cuando miro atrás en mis 50 años profesionales involucrado en Ingeniería de Rocas (desde 1963) percibo una peculiar tendencia, que afecta a las investigaciones de campo para túneles. En las primeras dos décadas de mis actividades tuneleras, observé tremendos desarrollos de nuevas técnicas de investigación de campo y el alcance creciente de los programas de investigación geotécnica basados en la comprensión de que un gasto suficiente de tiempo y dinero en las fases tempranas de un proyecto de túneles conducirá al final a un ahorro en el diseño y construcción, proporcionará una seguridad mayor y evitará costosas disputas o correcciones de invitados equivocados. Extrañamente, en las últimas dos décadas he apreciado precisamente una tendencia opuesta: a medida que la Propiedad/Planificadores intentaban ajustar sus presupuestos y los ingenieros de túneles competían por proyectos, el primer elemento para reducir costes y tiempos de ejecución era el alcance de las investigaciones de campo. Un énfasis creciente se colocó en la modelización computacional tanto para impresionar a la propiedad como para demostrar tener tecnologías innovadoras.

De hecho, se alcanzó un nivel en el que la sofisticación de los modelos matemáticos excedió ampliamente el nivel de fiabilidad de los datos de entrada de las propiedades de macizos rocosos a partir de investigaciones de campo limitadas. Todo esto nos lleva a una pregunta, que ya se ha planteado antes pero que ejerce más presión hoy debido a la aparición de mega-proyectos de túneles: "¿Cuándo es suficiente 'suficiente' para investigaciones de campo para túneles? Veamos algunos ejemplos. En los años 80 recopilé los datos relevantes de un importante número de proyectos durante una época de gran crecimiento de la industria de los túneles.

para investigaciones de campo para túneles? Veamos algunos ejemplos. En los años 80 recopilé los datos relevantes de un importante número de proyectos durante una época de gran crecimiento de la industria de los túneles.

Un ejemplo de los costes detallados de un proyecto de túneles

El caso del Proyecto de Elandsberg en Sudáfrica sirve como un ejemplo de una metodología de diseño exitosa presentando un enfoque costo-beneficio eficiente (Bieniawski 1992, p. 123-127). En vista del hecho que la investigación de Ingeniería de Rocas era tan extensa en alcance y tan ambiciosa, podría preguntarse cuáles eran los beneficios directos de los sondeos y túneles de exploración y cuáles eran los costes involucrados en el caso de diseño. Según se dijo antes, puesto que el autor se dio cuenta de la singularidad del proyecto desde el principio, mantuvo un diario de diseño recopilando los eventos técnicos, observaciones personales, decisiones de diseño, y costes. Parte de esta información se ha publicado (Bieniawski, 1976; 1984) con el permiso de la Propiedad.

La justificación de los ensayos in situ radicaba en el hecho de que no había otra manera fiable que hacer un ensayo a escala natural para predecir los vanos máximos de roca para construir la central. Además, en vista del inusual horizonte de meteorización, por ejemplo 60-100 m bajo superficie, a través de la cual el túnel de descarga tenía que pasar, hacía necesario en estos casos el agradamiento del ensayo del túnel de descarga para obtener el diseño más económico del túnel. Es más, sólo un ensayo in-situ a gran escala podría determinar fiablemente si un revestimiento de hormigón, en lugar de acero, era aceptable para los túneles en carga. Sólo esto ahorró a la Propiedad alrededor de \$260.000 (en dólares de 1977).

Además de estas justificaciones en relación a las excavaciones exploratorias, había beneficios directos; en particular, los túneles podían utilizarse cuando la verdadera construcción empezara. Por ejemplo, el túnel de acceso a los trabajos de exploración podía ensancharse para construir el eventual acceso principal del túnel.

Sobre todo, las condiciones de la roca se conocerían tan bien que el factor riesgo de 'condiciones imprevistas' podría ser eliminado de la oferta del contratista, obteniendo así un precio sustancialmente menor de su contrato. En relación a los costes totales de investigación en fase de diseño, incluyendo el programa de caracterización del terreno y los túneles de exploración suponían un 2,8% de los costes de construcción de las obras civiles del proyecto, según se indica a continuación. El coste de las investigaciones de Ingeniería de Rocas (diseño y análisis de datos, equipamiento y perforación de barrenos en pozos) ascendió a \$670.000, que supone sólo un 0,6% de los costes de construcción de las obras civiles.

El detalle de los costes totales (en EE UU dólares de 1980) es el siguiente:

- Instalaciones mecánicas y eléctricas: \$ 133.000.000 (41,6%)
- Instalaciones de superficie: \$ 63.800.000 (19,9%)
- Construcción de obras civiles: \$ 119.700.000 (37,4%)

- Costes de diseño: \$ 3.353.000* (1,05%)
* [2,8% de la construcción de obras civiles]
- **Costes globales: \$319.853.000 (100%)**

El detalle de los costos del diseño, que suman \$3.353.000, con los siguientes:

- Túneles piloto y pozos de ensayo: \$ 1.995.000 (59,5%)
- Sondeos para caracterización geológica: \$ 687.400 (20,5%)
- Diseño y análisis de datos (3 años): \$ 368.600 (11,0%)
- Equipamiento de mecánica de rocas: \$ 168.000 (5,0%)
- Ensayo de perforación en pozos: \$ 134.000 (4,0%)

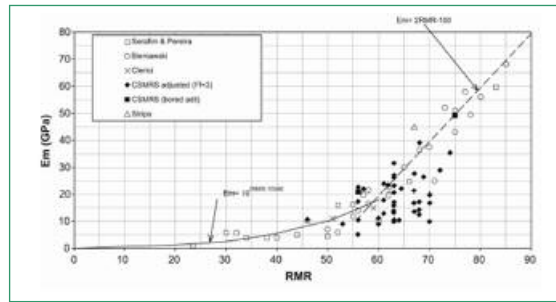
De este proyecto se concluye que las investigaciones en fase de diseño bien planificadas y ejecutadas ya se realizaban hace más de 40 años, utilizando un abanico de ensayos y metodologías que serían difícil de alcanzar incluso hoy en día. De hecho, la involucración del autor en este proyecto le proporcionó una experiencia en el diseño de tal riqueza que podría ser empleada en cualquier proyecto moderno sin temor de estar desfasado. Por el contrario, hoy en día algunas investigaciones en fase de diseño de grandes proyectos ni siquiera se aproximan a aquellos realizados en Elandsberg hace tanto tiempo. Por ejemplo, ¿no se han realizado ensayos de placa de carga a gran escala de este alcance en los EE UU en la pasada década!

Al mismo tiempo, el National Committee on Tunneling Technology (USNC/TT) publicó un gran estudio en 1984 titulado 'Geotechnical Site Investigations for Underground Projects: Review of Practice and Recommendations' y concluyó que "los costos para la exploración geotécnica del emplazamiento deberían promediar un 3% del coste estimado del proyecto". Los valores típicos a día de hoy son inferiores al 1%, lo que es totalmente incompatible con el más de 10% de media de los costos de proyecto distribuidos en pagos por concepto de reclamaciones legales, habitualmente atribuidas a condiciones del subsuelo imprevistas.

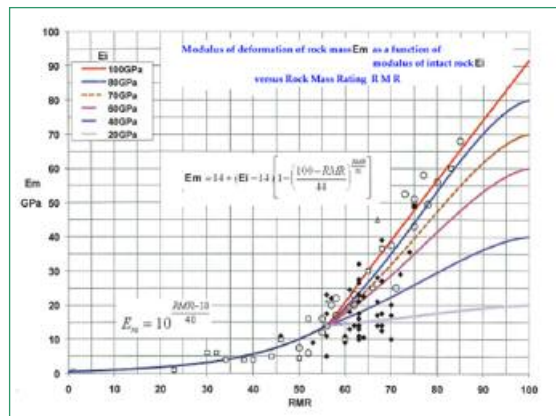
Sin embargo, esta recomendación requiere una considerable planificación y justificación, enunciada como sigue por la USNC/TT: "Las investigaciones geotécnicas in situ no pueden predecir cualquier problema que pueda ser encontrado y pretender hacerlo puede llevar a desarrollar programas que son desproporcionadamente caros para el valor que se recibe a cambio. Para todo proyecto subterráneo, el análisis coste-beneficio es un elemento clave. Aumentar el nivel de esfuerzo y fondos para la investigación es manifiestamente beneficioso y efectivo en términos de costes".

Por favor, ¿podría alguien de la audiencia compartir conmigo las comparaciones relevantes acerca de los gastos en investigaciones de campo de proyectos en Sudáfrica, particularmente de Brasil?

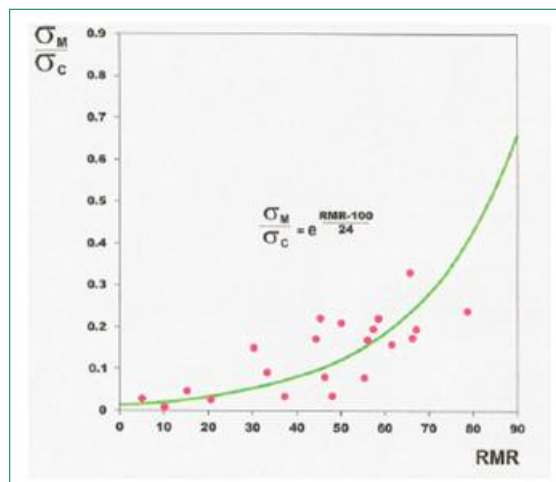
Consideremos otro ejemplo. En primer lugar, tenemos grandes deficiencias con la ausencia de medidas de tensiones in situ en el terreno y la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. Raramente tenemos noticias de un proyecto de un túnel donde el estado completo de tensiones se ha medido, digamos, mediante una célula triaxial CSIR o una célula 'doorstopper'.



Correlación entre RMR y el módulo de deformación de macizos rocosos (Palmström y Singh 2001).



Correlación mejorada para determinar el módulo de deformación de macizos rocosos EM en función del RMR y el módulo de roca intacta Ei (Lowson 2013).



Un criterio de resistencia para macizos rocosos en función del RMR y de la Resistencia a compresión uniaxial del material rocoso (Kalamas and Bieniawski 1995). Los datos experimentales provienen de ensayos de resistencia in-situ en Japón presentados por Aydan y Dalgic (1998).

Irónicamente, cuando las disputas causan furor hoy entre los expertos en energía sobre los aspectos del 'fracking', ¿cuántas medidas de fracturación hidráulica se hacen realmente para la determinación de las tensiones en túneles? Más aún, la resistencia del macizo rocoso nunca se mide, sólo se estima, empleando criterios empíricos de resistencia. La deformabilidad del macizo rocoso, o el módulo in situ, es otro ejemplo de las actuales deficiencias. ¿Pueden Uds. señalar un ensayo reciente a gran escala de placa de carga o un ensayo de un gran bloque a compresión simple llevado a cabo en su país? De hecho, no son comúnmente utilizadas. En su lugar, estamos empleando correlaciones (ver las figuras siguientes) basadas en la calidad del macizo rocoso las cuales, sin embargo, son sólo válidas en tanto puedan ser confirmadas por mediciones reales in-situ para el proyecto dado.

Así que, una vez más, bajo el espíritu de la recomendación de Sir Alan Muir Wood, por favor tomen nota de la 'idea para reflexionar #3': **"Asegurémonos de que la sofisticación de los modelos analíticos concuerda con la fiabilidad de los datos de entrada de las propiedades del macizo rocoso - ¡preferiblemente determinadas a partir de ensayos de campo fiables!"**.

Quo Vadis Ingeniería de Túneles

Habiendo identificado los tres aspectos valiosos que encerraban las 'ideas para reflexionar', la cuestión que aparece es cómo se cumplen los objetivos del lema de este Congreso y cómo encajan los artículos publicados en el programa. Más aún, ¿podemos predecir, como prometí en mi título, qué es lo que nos depara el futuro en términos de metodologías de diseño de túneles, formación de Ingenieros de Túneles y Planificadores no Técnicos, Gestores y Propiedad y en las campañas de reconocimiento del terreno? Esencialmente, ¿cómo podemos ayudar a los organizadores del Congreso a cumplir la misión enunciada en el lema de este año?

Bueno, en primer lugar la buena noticia es que los organizadores del Congreso han seleccionado un lema excelente: *'Túneles para una vida mejor'*, porque dicho lema también ha sido objeto de una atención especial en otras publicaciones como la de *The Economist* que presentó un número bajo el título 'El mundo en 2014' en el cual se presentaban los desarrollos más significativos y esperados para este año.

En la página 123 de esta publicación se encuentra el artículo: *'Grandes Túneles del Mañana: Un récord de túneles se excavará en 2014'*. En él se predice que en el año 2014 se excavará una longitud de más de 1000 km de túnel en este año y enfatiza — ¿adivináis qué? — ¡sí, los beneficios de los túneles y el desarrollo del espacio subterráneo! El artículo se centra en el uso de máquinas tuneladoras, que conocemos como TBMs, y destaca su potencial aplicación en América Latina como respuesta, entre otros, a los problemas de saturación de tráfico de algunas ciudades, animando a los gobiernos a ser más aventureros con los proyectos de túneles. El artículo concluye con la siguiente predicción: "un futuro excitante llama a las tuneladoras".

En términos de alcance de los artículos presentados en este Congreso, y en relación a las tres áreas sobre las que he reflexionado, el tópico diseño es el que ha recibido la mayor atención al aparecer en los títulos de 38 artículos.

Pero al mismo tiempo, no existen artículos relacionados con la formación de Ingenieros de Túneles y Personal no Técnico. Quizá, en el próximo Congreso, WTC 2015 en Dubrovnik, ¿debería dedicarse una sesión a este tema? Reto a nuestros amigos organizadores de Croacia que consideren esto, ¡por favor!

Finalmente, las investigaciones geotécnicas para túneles han sido nombradas en numerosos artículos, presentando los alcances de ensayos y estudios a realizar, pero no he obtenido orientación para responder a la pregunta: '¿Cuándo es suficiente, suficiente?' para compararlo con

una declaración anterior de Feng y Hudson (2011): **"Actualmente no existe un procedimiento internacional para revisar la idoneidad del diseño en Ingeniería de Rocas, pero probablemente se implementará en el futuro. La revisión de la información de campo como un componente más de una auditoría técnica general será un elemento clave para la validación de la metodología del diseño de ingeniería de rocas"**.

Predicciones: Algo esperado y algo nuevo

Consideremos lo que estaría por venir en lo referente a nuestros futuros desafíos, en particular en Sudamérica y recordemos la cita que presenté al inicio, del futurista Alvin Toffler: **"Los analfabetos del Siglo XXI no serán aquellos que no puedan leer ni escribir, sino aquellos que no puedan aprender, desaprender y volver a aprender"**.

Algo esperado: Coherentemente con la tendencia actual, podemos esperar y predecir que aumentará considerablemente el uso de TBMs y la mayor mecanización de las operaciones en los túneles. Recomendando, como una prioridad, el desarrollo de técnicas capaces de evaluar en tiempo real las condiciones del macizo rocoso por delante de las TBMs a medida que la construcción avanza.

Puesto que las excavaciones subterráneas serán cada vez más grandes, largas, profundas y complejas, serán también más difíciles de ejecutar y más costosas (recuerdo los tiempos en los que una TBM costaba unos pocos millones de dólares); de hecho, el año pasado la tuneladora de Seattle costó \$80 millones.

Por tanto, el diseño de túneles será más desafiante e impondrá reconocimientos geotécnicos más extensivos, incluyendo ensayos de campo a gran escala y túneles piloto de exploración. En esencia, datos de entrada fiables procedentes de ensayos de campo para determinar las propiedades del macizo rocoso estarán plenamente justificadas para ajustarse a la sofisticación de las técnicas de modelización numérica.

Algo nuevo: en Sudamérica, donde la sabiduría popular de los Andes ha sido consagrada en poemas y canciones, tales como en el peruano *'El Cóndor Pasa'* del compositor Daniel Alomía Robler y cantada por Simon & Garfunkel, se puede esperar la construcción de túneles para acceder a las gran-



Bibliografía

- Aydan, O. and Dalgic, S. 1998. "Prediction of deformation behavior of Bolu tunnels through squeezing rocks". Proc. Symp. on Sedimentary Rock Engng. Taipei, Taiwan, pp. 228-233.
- Barton, N. and Bieniawski, Z.T. 2008. "Setting the record straight about RMR and Q." Tunnels & Tunneling, v. February, pp.26-29.
- Berry, A. 1996. **The Next 500 Years**. W H Freeman & Co, New York
- Bieniawski, Z.T. 1973. "Engineering Classification of Jointed Rock Masses". The Civil Engineer in South Africa, v.15, pp.335-343.
- Bieniawski, Z.T. 1984. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, Z.T. 1989. **Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual**. John Wiley and Sons, New York.
- Bieniawski, Z.T. 1992. **Design Methodology in Rock Engineering**. A. Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, Z.T., Celada, B.; Aguado, D. and Rodríguez, A. 2011. "Forecasting tunnelling behaviour". Tunnels & Tunneling, v. August, pp.39-42.
- Bieniawski, Z.T. 2011. "Misconceptions in the applications of rock mass classifications and their corrections". www.geocontrol.es, link to: Bieniawski's Window.
- Bieniawski, Z.T., Celada, B.; Tardáguila, I. and Rodríguez, A. 2012. "Specific energy of excavation in detecting tunneling conditions ahead of TBMs". Tunnels & Tunneling, v. February, pp.65-68.
- Celada, B. 2011. **Manual de Túneles y Obras Subterráneas**. Madrid: UPM. Capítulo 23. pp. 850-854. Celada, B., Tardáguila, I. and Varona, P. 2014.
- "Innovating Tunnel Design by an Improved Experience-based RMR System". Proc. World Tunnel Congress, ITA, Brazil, pp.60-68.
- Feng, X and Hudson J A 2011. **Rock Engineering Design**. CRS Press, Leiden.
- Hudson J A 2012. **The next 50 years of ISRM and anticipated future progress in rock mechanics. Harmonizing Rock Engineering with Environment**, Taylor & Francis, London, pp. 47-55.
- Lowson, A.R. and Bieniawski, Z.T. 2013. Critical assessment of RMR-based tunnel design practices: A practical engineer's approach. Proc. RETC 2013. Washington, DC: Society of Mining Engineers, pp.180-198.
- Lowson, A.R. and Bieniawski, Z.T. 2012. "Validating the Yudhbir-Bieniawski rock mass strength criterion". Proc. World Tunnel Congress, ITA, Bangkok.
- Kalamaras, G and Bieniawski, ZT, 1995. A rock mass strength concept incorporating the effect of time. Proc. 8th ISRM Congress, Tokyo, Sept., pp. 295-302.
- Muir Wood, A. 2002. **Tunneling: Management by Design**. E & F N Spon, London.
- Palmström, A. 1995. "Characterising rockburst and squeezing by the rock mass index". In Design and Construction of Underground Structures, New Delhi, 23 - 25 February 1995.
- Palmström, A. and Singh, R. 2001. "The deformation modulus of rock masses". Tunneling and Underground Space Technology, v.16, pp. 115-131.
- Serafim, J. L. and Pereira, J. P. 1983. "Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski". Proc. Symp. on Engineering Geology, Lisbon, v. I, pp. 33-44.
- Stacey, T. R. 2013. "Dynamic rock failure and its containment – a Gordian Knot design problem". Rock Dynamics and Applications. Taylor & Francis, London, pp. 57-70.

des reservas de cobre, plata, oro y los minerales estratégicos necesarios para las nuevas tecnologías.

Estos túneles se situarán a mayores profundidades que en la actualidad, en condiciones donde los llamados estallidos de roca y altas presiones de agua dificultarán su construcción. A propósito, he leído que se han observado numerosos estallidos de roca durante la construcción del Túnel Transandino de Los Olmos en Perú.

Me acuerdo al volar sobre los Andes viajando de Chile a Argentina, y de vuelta por otra ruta, y ver la vasta extensión de estas montañas – unos 500 km de anchura. Una minería creciente en Los Andes precisará de un mejor acceso; serán esenciales nuevos y mejores ferrocarriles y carreteras, que a su vez requerirán más túneles para evitar rampas pronunciadas y curvas cerradas de carreteras y vías. La mina de oro de Pascua Lama me viene a la mente.

Además, algunas **prácticas geotécnicas** habrán de ser revisadas; no sólo mediante campañas geotécnicas mayores, según se mencionó antes para obtener datos fiables para los diseños, sino también desarrollando modelizaciones mejoradas para incluir los efectos de la plastificación bajo grandes tensiones, e incorporar mecanismos post-rotura, así como – en casos especiales – estudiar problemas acoplados de naturaleza mecánica-hídrica-térmica-química.

En relación a las **tuneladoras**, cuya utilización será mayor, los desafíos serán excavar túneles bajo grandes presiones de roca y carga de agua, tanto en condiciones de roca dura como suelos blandos; estos desafíos son simplemente extraordinarios. Así pues necesitamos adquirir una mejor comprensión de la capacidad de predecir sus efectos, de las tensiones del terreno y sus cambios, y el fenómeno de los estallidos de roca y las medidas para su mejora. El planificado Corredor Bi-Oceánico de Aconcagua –línea de ferrocarril– entre Argentina y Chile es un ejemplo de un proyecto en planificación enfrentado a estas cuestiones.

Para todo esto, el potencial de las **técnicas geofísicas** no debería ser ignorado; pues cada vez tendrán mayores aplicaciones dado su rápido desarrollo a medida que mejora la tecnología. Finalmente, la instrumentación y medidas de convergencia durante la construcción se convertirán en indispensables bajo condiciones más difíciles.

Conclusiones

Para concluir esta conferencia desearía felicitar los organizadores del Congreso por hacer de esta ocasión un evento tan significativo para la comunidad de los Túneles y por aumentar el conocimiento de la sociedad de los beneficios y logros de nuestra profesión en toda su extensión. Hemos mostrado que en el futuro debemos prestar más atención a las metodologías de diseño del túnel, a una mejor formación de los nuevos Ingenieros en Túneles y de los Planificadores no técnicos y Gestores, así como mejorar la relación coste-beneficio de las campañas geotécnicas realizadas.

Hoy, me ha llegado el momento de 'poner punto y final', lo que significa que, tras una larga carrera, necesito colgar el

casco y ésta es mi última oportunidad de dejaros un mensaje de despedida puesto que felizmente concluyo mis actividades profesionales en la teoría y práctica del diseño y construcción de túneles. Digo felizmente porque he descubierto un secreto personal para obtener una satisfacción completa en la profesión que he elegido y quiero compartirla con vosotros. El secreto es simplemente involucrar a sus esposas y parejas en su trabajo. Mi esposa, en 50 años de matrimonio, siempre ha estado a mi lado editando mis libros, artículos y a menudo encontrando formas de mejorarlos, así como escuchando mis presentaciones en numerosas conferencias. De hecho, ella está aquí ahora no sólo como acompañante sino también como compañera a nivel técnico. Creedme, una esposa feliz es una gran inversión de cara a una carrera de túneles exitosa y que se pueda disfrutar.

Esta fotografía fue tomada el año pasado en nuestro 50 aniversario de boda, por lo que mi esposa ha tolerado mi 'adicción' a los túneles durante todos estos años. Y en esta nota, puesto que estamos a punto de clausurar e iniciar la cena de gala, les insto a explorar, con la mentalidad de Sir Alan Muir Wood, simplemente cuál es 'esa' buena idea que han adquirido en este congreso, y por favor compártanla con sus compañeros de cena. ¡Eso inspirará a otros a compartir y discutir sus mejores ideas con ustedes! Y, ¿quién sabe? Cuando vuelvan a su oficina y compartan su mejor idea con su jefe, ¡incluso podrían conseguir una botella de buen vino!



El futuro de los túneles me parece asegurado y desearía dejaros con la moral alta con esta cita: ***"El entusiasmo es el activo principal en el mundo; mucho más que el dinero, el poder y la influencia"***. Henri Chester. /

Geocontrol, S.A.

Cristóbal Bordiú, 19 - 21, 5º
28003 Madrid (España)

Tel. 915 531 763 • geocontrol@geocontrol.es
www.geocontrol.es



Metros

Túneles Ferroviarios

Túneles Viales

Centrales Hidroeléctricas

Supervisión y Control de Obras

Gestión de la Instrumentación

Geotecnia Minera

Instalaciones de Seguridad

Inspección Estructural

Proyectos de Rehabilitación

www.geocontrol.es

Estación Nuñoa, Línea 6 del Metro de Santiago (Chile)

Especialistas en Ingeniería del Terreno y Obras Subterráneas

GEOCONTROL DO BRASIL ENGENHARIA LTDA.
Av. Angélica, 1761 - conj. 141/142
Higienópolis | São Paulo | Brasil
CEP 01227-200
T. 55 11 3666 6816
www.geocontrolbrasil.com

GEOCONTROL LTDA.
Oficina en Santiago
Marchant Pereira, 367, 6º, Of. 605
Providencia | Santiago | Chile
T. 56 22 269 5456
Oficina en Calama
Avda. Matta Nº 2011
Edificio Nº 51, Condominio Matta
Calama | Antofagasta | Chile
T. 56 55 254 7627
www.geocontrolchile.com

GEOCONTROL COLOMBIA
Calle 93 B No. 18-45
Oficina 201
Bogotá | Colombia
T. 57 1 621 0523
www.geocontrolcolombia.com

GEOCONTROL, S.A.
Cristóbal Bordiú 19-21, 5º
28003 Madrid | España
T. 34 91 553 17 63
F. 34 91 554 93 96
geocontrol@geocontrol.es

GEOCONTROL ANDINA, SAC
Elias Aguirre, 126, Of. 405
Miraflores
Lima 18 | Perú
T. 51 1 445 4354
www.geocontrolandina.com