

LA CAVERNA OLIMPICA

EN LA MONTAÑA NORUEGA DE GJØVIK

Record mundial de la ingeniería subterránea

José Antonio Juncá Ubierna*
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La Caverna Olímpica de Gjøvik, en Noruega, es un recinto subterráneo multipropósito construido con ocasión de celebrarse los Juegos Olímpicos de Invierno Lillehammer 1994 para albergar la competición de hockey sobre hielo; puede también acoger otras actividades culturales y está proyectada además como refugio.

Se trata de la construcción subterránea para uso público más grande del mundo, con un récord de luz libre de 61 metros, siendo única a nivel tecnológico.

El artículo proporciona una panorámica de esta obra singular, su génesis, proyecto, estudios previos, modelos matemáticos, método constructivo, instalaciones, medidas medioambientales y programas de I+D desarrollados.

La Caverna Olímpica de Gjøvik es el máximo exponente actual de la ingeniería subterránea para uso público en todo el mundo.

The Gjøvik Olympic Mountain Hall, in Norway, is a multipurpose underground space built to hold the ice hockey competition during the Winter Olympic Games Lillehammer 1994; the cavern can also be used for other cultural activities and has been designed as Shelter.

This is the biggest underground construction for public use all over the world, with a record span of 61 meters, being technologically unique.

The article provides an overview of this amazing public work, the decision to go underground, project, site investigations, numerical models, construction system, installations, environmental measures and I+D research programs involved.

The Gjøvik Olympic Mountain Hall is, actually, the highest landmark on underground engineering for public use worldwide.

Introducción

Gjøvik es una hermosa población de 26.000 habitantes, la mayor en la provincia de Oppland, a orillas del lago Mjøsa, el mayor de Noruega. En este apacible lugar, a dos horas escasas de viaje por carretera o tren- al norte de Oslo se celebró entre los días 14 y 17 de junio de 1994 el Primer Symposium Internacional sobre "Espacios subterráneos para uso público" y en el que participaron

expertos de los cinco continentes representando a más de 25 países.

En las sesiones del Symposium, celebrado en el marco de los Seminarios EUREKA Lillehammer '94, se presentaron ponencias en relación con los ámbitos de la ingeniería en la roca, las instalaciones de ventilación y aire acondicionado en cavernas en roca, la seguridad ante el fuego y estrategias de evacuación, los impactos psicológicos de los espacios subterráneos así como la presentación de experiencias y realizaciones, destacando una sesión monográfica- que abrió el encuentro tras la apertura oficial efectuada por el Profesor Einar Broch- dedicada a la Caverna Olímpica de Gjøvik.

*Consultor. Presidente de la Sesión Plenaria sobre Realizaciones en el Symposium Internacional sobre "Espacios subterráneos para uso público". Gjøvik, Noruega. Junio 1994.

Recibido en ROP: julio 1994

En el transcurso de este acontecimiento se puso de manifiesto el estado del arte a nivel mundial en materia de ingeniería subterránea para uso público, mostrándose diversas realizaciones de notable interés; además, se presentaron ambiciosos proyectos que, si bien aparentemente rozan la ciencia ficción, serán una realidad en las próximas décadas; pero, como contraste, también se evidenciaron lagunas como por ejemplo la carencia, casi total, de normas y legislación que regule la utilización del espacio subterráneo.

Como único ponente español en el Symposium de Gjøvik, en contraste con la delegación coreana en torno a las treinta personas, quisiera transmitir desde estas páginas la emoción que sentí al adentrarme en esa caverna olímpica de Gjøvik, en la que los noruegos han batido de largo records mundiales en el campo de la ingeniería subterránea, concretamente la máxima luz libre en la bóveda lítica ha pasado de 38 m. a los 61 de Gjøvik.

Experiencia noruega en la utilización del subsuelo

La Caverna Olímpica de Gjøvik, como no podría ser de otro modo, no surge por generación espontánea ni como fenómeno singular. Se trata de un brillante exponente del nivel alcanzado por Noruega en el campo de la ingeniería subterránea que lleva al país nórdico a posiciones de liderazgo en el concierto internacional.

Así, la utilización del subsuelo tiene una larga tradición en Noruega; basta recordar unos pocos datos: funcionan en la actualidad en este país, cuya extensión territorial está ocupada en más del 50% por roca expuesta y de intensas precipitaciones en alta montaña, 200 centrales hidroeléctricas subterráneas, el 50% del total de este tipo de instalaciones en todo el mundo. Se han perforado más de 3.500 Km. de túneles para la industria hidroeléctrica. Además, los 750 túneles de ferrocarril y 850 túneles de carretera constituyen elementos vitales de la red noruega de transportes. Otras importantes instalaciones se ubican también bajo tierra, tales como plantas de tratamiento y depuración de agua, túneles para abastecimiento de agua potable, túneles para evacuación de aguas negras, cavernas para almacenamiento de agua potable, petróleo y otros hidrocarburos, aparcamientos subterráneos, etc.

Mención aparte merece aquí la construcción de recintos subterráneos multipropósito; desde el año 1968, más de 16 instalaciones subterráneas deportivas de este tipo han sido construidas y utilizadas en Noruega, siendo su utilidad, en tiempos de paz, como centros de deporte y actividad y, en caso de guerra sirven como refugios públicos.

Esta combinación ha dado lugar a unos costes de construcción muy razonables.

Por otra parte, la experiencia acumulada demuestra unos muy bajos costes de operación y mantenimiento. En la actualidad, las nuevas técnicas de excavación hacen que estas instalaciones en la roca resulten mucho más económicas y puedan competir con las construcciones tradicionales a cielo abierto.

Precisamente en Gjøvik fue abierta al público en 1975 la primera piscina pública subterránea, recinto proyectado además como refugio. Con posterioridad, junto a la piscina se excavó el centro regional de telecomunicaciones, en lugar seguro y próximo al centro de la ciudad. De esta forma, la montaña Hovdetoppen ya albergaba diversos equipamientos cuando se pensó en que también acogiese en su seno la Caverna Olímpica, como una de las instalaciones estrellas construidas con ocasión de la adjudicación en 1988 de los XVII Juegos Olímpicos de Invierno a la ciudad de Lillehammer y su entorno.

La decisión: ¿Por qué construir un palacio de deportes en la montaña?

En 1989, los ingenieros Jan A. Rygh y Helge Simenstad tuvieron la idea de construir en Gjøvik un pabellón olímpico para hockey sobre hielo bajo la montaña, junto a una piscina subterránea ya existente.

Gjøvik tenía que responder al reto de los Juegos y se planteó dos alternativas: ¿la emoción del hockey hielo, de la competición deportiva al más alto nivel se viviría a cielo abierto o en la profundidad de la roca?

El municipio tenía que tomar una difícil decisión: construir el pabellón revestido de aire o de roca. Cada opción reunía pros y contras que habían de sopesarse de forma global.



*Vista aérea de Gjøvik
con indicación del
emplazamiento de la
Caverna*

Así, los argumentos en contra de la construcción subterránea eran:

- El riesgo, ya que nunca se había construido algo semejante antes.
- La seguridad.
- El tiempo de que se disponía para la construcción.
- La exclusión de la construcción industrial local.
- El coste.
- Una construcción en la superficie podría ser instalada en un lugar más favorable.

Por su parte, los argumentos a favor de perforar la caverna eran:

- Localización en el centro de la ciudad con fácil acceso.
- Todas las infraestructuras (carreteras, agua, electricidad, teléfono, etc.) ya existían en el lugar.
- La experiencia con la piscina subterránea existente era excelente.

- Adecuación medioambiental.
- Bajo coste energético y de mantenimiento.
- Fácilmente transformable en un excelente refugio en caso necesario.

Además, la opción en el interior de la montaña representaba una oportunidad única para:

- Presentar a todo el mundo la tecnología noruega de la excavación en roca.
- Hacer investigación a escala real en grandes extensiones.
- Desarrollar métodos de excavación y soportado de grandes extensiones.
- Mostrar las posibilidades de utilización futura de este tipo de construcciones para diversas aplicaciones.
- Mostrar el valor del subsuelo.

El día 24 de enero de 1991, después de una concienzuda investigación, el Ayuntamiento de Gjøvik tomó la decisión histórica de construir la caverna olímpica, en base a la idea original. Se

había dado luz verde a la construcción de la mayor caverna excavada en todo el mundo para uso público.

Descripción general del Proyecto de la Caverna Olímpica de Gjøvik

La construcción del Palacio de Hielo en la montaña Hovdetoppen, incrustada en el centro urbano de Gjøvik ha partido de un macizo rocoso creado hace mil quinientos millones de años. Lo que la madre naturaleza inició hace tanto tiempo, la comunidad de Gjøvik y una serie de empresas líderes noruegas ha transformado en la caverna más inmensa del mundo para deporte y actividades públicas. Al logro de este objetivo, se ha empleado la base de conocimiento más avanzada en ingeniería en la roca.

■ Calendario de la construcción

Los trabajos de construcción comenzaron en abril de 1991, las obras de excavación y voladura se completaron en diciembre de ese mismo año; el resto de los trabajos de construcción, tales como hormigonado e instalaciones técnicas se acometieron durante 1992 y el primer trimestre de 1993; en marzo de ese año se realizaron las últimas tareas de comprobación y el estadio fue inaugurado oficialmente en mayo de 1993.

En el diseño arquitectónico se dio importancia a la puesta en valor del recinto subterráneo, a un sistema de iluminación contrastado y a un trata-

miento estético en el que se combinan los detalles con la austeridad.

■ Situación

El Palacio de deportes de Gjøvik es difícil de localizar, incluso si cuentas con el dato de que está enclavado en el centro de la ciudad. Uno puede recorrer las tranquilas calles de esta pintoresca localidad sin hallar rastro de un recinto con capacidad para más de 5.500 espectadores. El sabor pintoresco del lugar permanece intacto, las casitas que van remontando y poblando la ladera de la colina.

Al final de la céntrica calle peatonal Storgata encontramos la despejada Plaza Olímpica y allí, a la derecha, una estructura en aluminio que se asemeja a una máscara vikinga es la única referencia visible de la Caverna Olímpica.

He aquí una de las ventajas de la solución excavada en la roca: su perfecto encaje y armonía con el entorno circundante, sin alterar visualmente el lugar.

■ Geometría: Record mundial

La caverna principal tiene una luz libre de 61 m., con mucho la mayor del mundo, una longitud de 91 m. y una altura máxima de 25 m.

Durante la celebración de partidos de hockey sobre hielo la capacidad total de asientos es de 5.500.



Entrada principal a la Caverna Olímpica de Gjøvik.

Foto: Henning Gulbrandsen

Las principales características de la obra se recogen en la Tabla 1.

■ El diseño

La decoración interior del Pabellón Olímpico es notable. Nada más llegar, los visitantes son recibidos con los diseños artísticos de la entrada. Per Inge Bjørlo es el responsable de este trabajo artístico hecho de acero inoxidable.

Un gran suelo de pizarra da la bienvenida en la entrada de la caverna, conocido como "El jardín de la caverna".

El "Pilón", hecho de roca diabasa, está situado en medio de The Cavern Garden y, a semejanza de las monumentales puertas de entrada a los antiguos templos egipcios, sirve de pórtico en el acceso principal al Palacio Subterráneo. El contrapunto entre el "Pilón" y las conducciones de impulsión de aire crea un entorno no exento de magia en la antesala de la gran caverna.

Los largos corredores bajo los graderíos han sido decorados con piezas de granito y reproducciones de pinturas rupestres.

■ Configuración de la Caverna Olímpica de Gjøvik

Además del Estadio Polideportivo propiamente dicho, la caverna consta de todo un conjunto de instalaciones y servicios, destacando el túnel principal de acceso que termina en unas imponentes puertas blindadas que garantizan la invulnerabilidad del interior del recinto en caso de guerra; un amplio vestíbulo en la roca sirve de antesala al recinto principal; en un lateral, el restaurante y, más allá, la piscina subterránea.

Destacan las salidas de emergencia, las instalaciones de ventilación así como el extremo cuidado con que se han diseñado las instalaciones para los medios de comunicación que permiten una perfecta realización de las transmisiones por televisión de los acontecimientos deportivos o culturales que en el Palacio Subterráneo se celebran.

Destacar también que todas las instalaciones y servicios se han proyectado y construido total-

Tabla 1. Características de la Caverna Olímpica de Gjøvik

CARACTERISTICAS	VALORES
Anchura.....	61 m
Longitud.....	91 m
Altura.....	25 m
Volumen excavado de roca.....	165.000 m ³
Volumen del estadio.....	114.000 m ³
Volumen jardín de invierno + entrada principal	10.000 m ³
Superficie bruta (incluyendo corredores)	14.910 m ²
Superficie neta	10.010 m ²
Superficie pista de hielo	1.965 m ²
Superficie locales públicos.....	2.224 m ²
Superficie Centro para medios de comunicación	2.110 m ²
Superficie Instalaciones participantes.....	263 m ²
Superficie Administración + Area VIP	577 m ²
Superficie Instalaciones técnicas y eléctricas.....	638 m ²
Superficie Instalaciones adicionales almacenamiento.....	1.100 m ²
Asientos para el público	5.200
Máximo número de espectadores + participantes	5.800
Capacidad como refugio público (nº de personas)	2.000

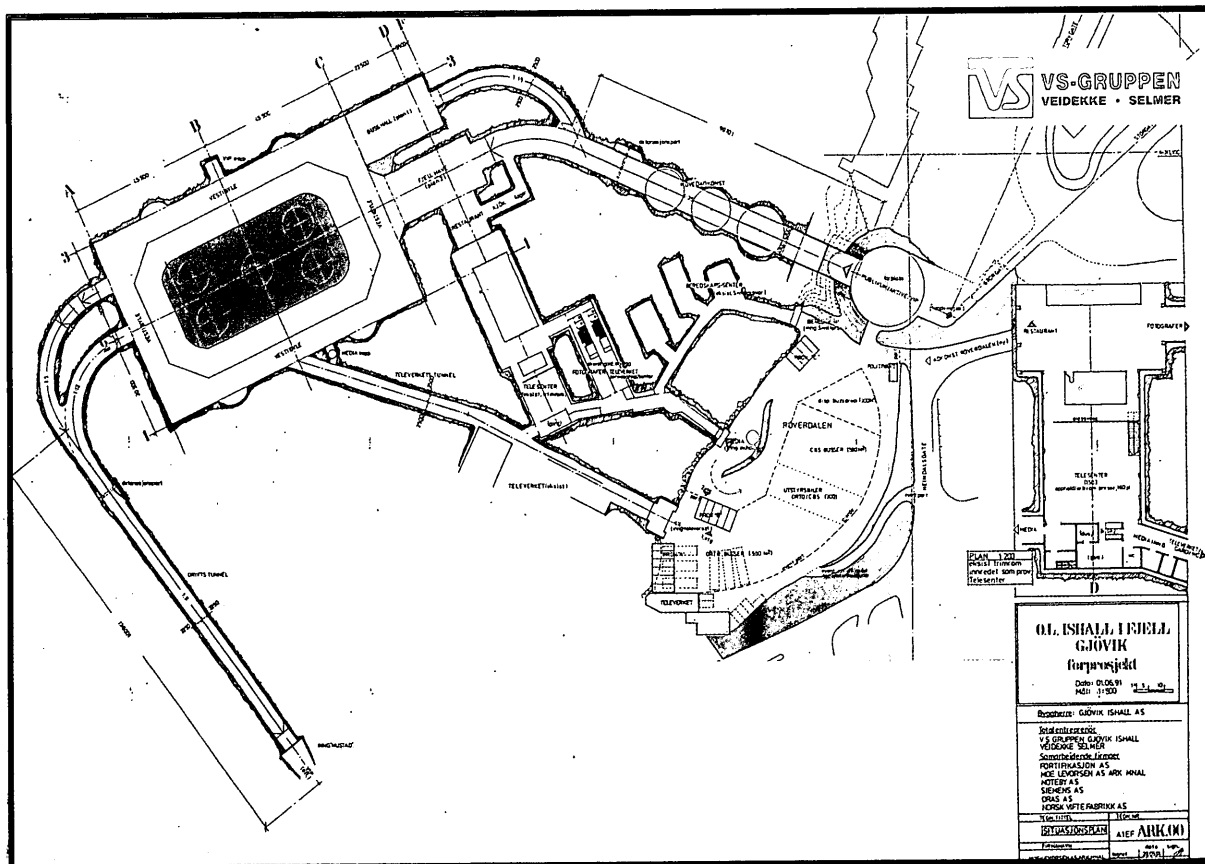
mente accesibles y permiten su uso por cualquier persona con o sin movilidad reducida.

■ Responsables del proyecto y construcción

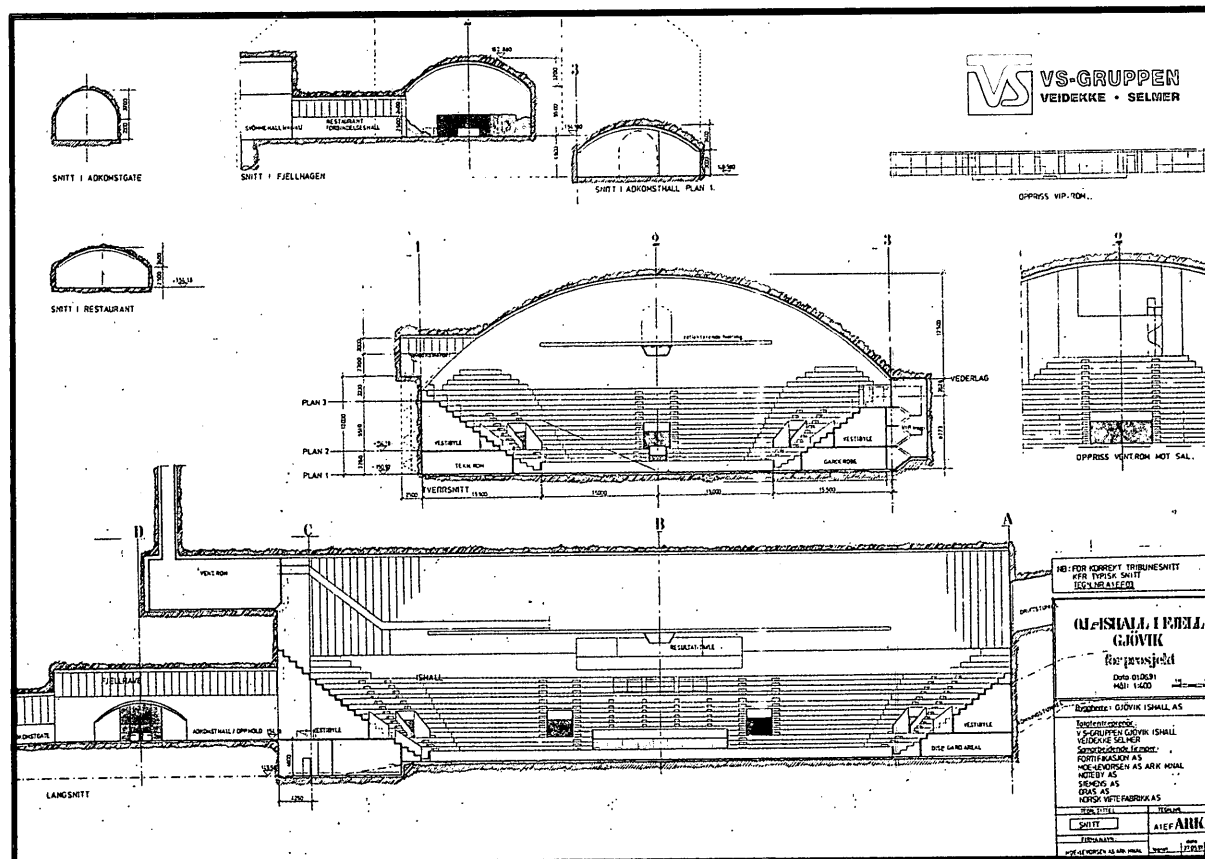
Noruega logró en torno a las 30 medallas olímpicas en los Juegos de Invierno de 1994; sin duda, una gran medalla de oro fue la obtenida por la ingeniería civil y mecánica noruega con la construcción del Palacio Subterráneo de Gjøvik.

A menudo, los protagonistas directos de las grandes obras públicas pasan desapercibidos; creo de justicia, y también de interés para el lector, citar las principales Compañías que con su trabajo coordinado y complementario han hecho realidad esta impresionante obra en la que los resultados son suficientemente elocuentes: los trabajos se completaron en base al presupuesto establecido, sin accidentes- ni una sola víctima o herido de consideración-, terminándose las obras e instalaciones con tres meses de adelanto respecto de la fecha prevista.

**Disposición general
en planta del recinto
de la Caverna.**



Secciones longitudinal y transversal de la Caverna.



El trabajo se organizó como un proyecto total, lo que significa que los contratistas fueron responsables de la planificación y el proyecto así como también de la construcción de las instalaciones.

En la Tabla 2 se resumen las principales Compañías participantes en los trabajos indicando su área de actividad.

■ Características singulares

El Pabellón Olímpico de Gjøvik no es sólo el más grande de su tipo del mundo, sino que también presenta características técnicas singulares en relación con los estudios sobre mecánica de rocas, evacuación en caso de fuego, conservación de energía y evaluación de efectos socio-psicológicos en el entorno subterráneo.

Ha de destacarse el completo Programa de I+D tanto teórico como aplicado que se ha venido desarrollando en paralelo con el proyecto.

La seguridad en la ejecución de las obras, en el proceso constructivo fue extremadamente buena y en consecuencia no se registraron heridos graves ni muertos entre las personas que intervinieron en el proyecto.

■ Materiales

Todos los materiales y todos los elementos constructivos satisfacen las especificaciones del Código de construcción Noruego, la reglamentación sobre el fuego así como el resto de códigos y regulaciones oficiales de aplicación.

Un especial énfasis se ha puesto en la economía de las construcciones en lo que respecta a instalación y mantenimiento.

Muy estrictas han sido las especificaciones relativas a la elección de materiales considerando los riesgos de incendio.

Se prestó asimismo especial atención al tratamiento acústico del recinto, llevándose a cabo programas informáticos específicos; algunas zonas del techo de acero han sido recubiertas con pantallas acústicas instaladas de forma artística; la acústica en el interior del palacio y en el vestíbulo principal puede considerarse excelente.

Tabla 2. Principales Empresas participantes en el Proyecto y Construcción de la Caverna Olímpica de Gjøvik:

EMPRESAS	ACTIVIDADES DESARROLLADAS
* Grupo Noruego de Construcción (NOCON)	● Responsable del proyecto total incluyendo planificación, diseño y construcción.
* Fortifikasjon A/S	● Consultor principal responsable del planeamiento general, proyecto, estructuras, ingeniería civil, mecánica y eléctrica del proyecto.
* NOTEBY A/S (Miembro de Norconsult International A/S)	● Responsable de geotécnia, mecánica de rocas, reconocimientos geológicos, evaluación y proyecto de trabajos de sostenimiento, auscultación, control de vibraciones e inspecciones de la propiedad.
* Instituto Noruego de Geotécnia (NGI)	● Clasificación del macizo rocoso, Método-Q ● Investigaciones previas ● Modelización numérica, UDEC-BB ● Diseño del sostenimiento y análisis de estabilidad ● Control in situ e instrumentación
* SINTEF (Fundación para la Investigación Científica e Industrial del Instituto Noruego de Tecnología)	● Ingeniería geológica ● Mecánica de rocas ● Construcción ● Seguridad ante el fuego ● Ventilación ● Uso de energía ● Estudios de riesgo
* Grupo de Explosivos DYNO	● Técnicas de explosivos y voladuras bajo fuertes restricciones a las vibraciones y a la calidad de la superficie final de la roca.
* Statkraft SF (Corporación Noruega de Energía)	● Forma parte del Programa de Investigación y Desarrollo "Caverna-Stadium en la roca", como consejero, coordinador y colaborador financiero.

Otra importante característica de este recinto es que ha sido proyectado y calculado como posible refugio; a tal fin, la entrada principal se puede cerrar con pesadas puertas de hormigón que convierten el Pabellón bajo la montaña en un refugio público para 2.000 personas.

El coste total de la Caverna Olímpica de Gjøvik ha sido de 137.7 millones de coronas noruegas, que equivalen aproximadamente a 2.600 millones de pesetas. El proyecto ha sido financiado por las autoridades gubernamentales y locales.

Geología y trabajos de campo

La colina Hovdetoppen que acoge la caverna de Gjøvik está constituida por gneises graníticos del Precámbrico, de los que se han descrito dos tipos (Morset & Loseth, 1993), uno rojizo y uno gris. La composición de ambos consiste en un 30% de cuarzo, un 65% de feldespato y un 5% de clorita, mica y hornablenda. Este tipo de roca es conocida por su buen comportamiento en construcciones subterráneas.

Se han originado múltiples juntas, casi verticales, resultado probablemente de la actividad de diaclasado del Permiano. Algunas juntas están mineralizadas por cristales de calcita, epidota, clorita, albita, barita y cuarzo.

Se realizaron gran número de estudios geológicos antes de empezar con el trabajo de excavación:

- La mejor información geológica se obtuvo a través de otras construcciones subterráneas de la zona.
- Perforación para extracción de muestras.
- Ensayos de los diferentes tipos de rocas midiendo las tensiones y deformaciones en la montaña, así como varias mediciones geofísicas, utilizando ultrasonidos enviados a través de la roca para determinar sus cualidades.

La cualidad de las rocas fue descrita utilizando el llamado "Método-Q", cuya utilidad fundamental es proporcionar elementos de juicio para diseñar las protecciones y refuerzos necesarios en la roca excavada.

Las mediciones de tensión "in situ" mostraron el modelo común de las rocas del precámbrico Escandinavo donde la tensión horizontal in situ es más alta que la vertical. Mediciones preliminares realizadas por SINTEF Trondheim en un pequeño taladro de una caverna existente indicaban una tensión horizontal de aproximadamente 4,3 MPa y una mínima tensión vertical de 1,8 MPa al nivel de la bóveda de la caverna.

Subsiguientes mediciones de fracturación hidráulica y de tracción/compresión por medio de gatos llevadas a cabo en la Fase II por NGI confirmaron el elevado nivel de tensiones generalizado.

Análisis del comportamiento de la roca: Modelos

El diseño del Pabellón de Gjøvik está basado en bien conocidos principios que rigen la relación entre la luz y la altura de la bóveda. Debido a la inusual dimensión de la caverna se decidió emprender un estudio de la geometría elegida con la ayuda del análisis de elementos finitos.

El principal propósito del análisis matemático era verificar que la geometría de la caverna presentaba condiciones de estabilidad. Era también de gran interés predecir el orden de magnitud de los desplazamientos o corrimientos en la bóveda de la caverna así como examinar qué parámetros de la roca eran los más importantes.

Como una estrategia de control de calidad, las instituciones investigadoras realizaron estudios matemáticos paralelos utilizando diferentes modelos; así, mientras NGI aplicó un modelo de bloque discontinuo (UDEC-BB), SINTEF utilizó un modelo de elemento de contorno (BESOL).

El análisis de elementos finitos nunca será un sustituto de la experiencia en el diseño de cavernas de grandes dimensiones. Sin embargo, no hay duda de que los modelos matemáticos son una herramienta útil con la que cuentan los ingenieros para verificar sus soluciones con respecto a la estabilidad global o local del material y para estimar la magnitud de los desplazamientos alrededor de la caverna.

La cobertura de roca en la Caverna de Gjøvik varía entre los 25 metros y los 52 metros. Con un vano en la bóveda de 61 metros podía preverse que este rango de coberturas tuviera incidencia significativa en los valores de las tensiones y desplazamientos, razón por la cual las diferentes coberturas de roca se tuvieron en cuenta en el análisis por elementos finitos.

El análisis de elementos finitos tuvo por objeto estudiar la distribución de tensiones y de desplazamientos en el macizo rocoso en torno a la ca-

verna así como en la periferia de ésta durante las diferentes etapas de la excavación.

■ Procedimiento de los elementos finitos

El análisis se realizó utilizando el programa RSFEAX (Análisis de Elementos Finitos en la Interacción Estructura-Roca incluyendo Excavación), desarrollado en por Athanasiu, Simonsen y Ronning.

El programa está basado en elementos de elasticidad lineal e isoparamétricos que modelizan bloques de roca intactos, con la posibilidad de añadir elementos de contacto que modelen el comportamiento de las juntas y elementos estructurales para modelar los refuerzos.

El análisis consta de dos fases: "aplicación del campo de tensiones inicial" y "análisis secuencial".

El análisis de elementos finitos en la fase de simulación del campo de tensiones inicial se realiza asumiendo que, para cada material, la relación k_0 entre la tensión horizontal y la vertical es un dato de partida. El programa utiliza, para esta fase, la correspondiente relación de Poisson:

$$\nu_{eq} = \frac{k_0}{1 + k_0}$$

garantizando que bajo condiciones laterales contenidas, la razón de tensiones horizontales a verticales es k_0 .

Las calculadas en esta etapa son las tensiones iniciales para las siguientes secuencias del análisis, mientras que los desplazamientos y deformaciones son iguales a cero.

En la fase de estudio secuencial, los análisis incrementales se realizan para cada "secuencia de construcción"- como por ejemplo la aplicación de cargas, excavación de una serie de elementos, activación de elementos estructurales, etc.- donde los cambios en las tensiones se calculan por adición -incremento de cargas- y/o por extracción-excavación- de elementos. Los desplazamientos nodales, deformaciones del elemento y

tensiones calculadas en una secuencia son añadidos a aquellos de la secuencia previa.

El modelado del sistema de juntas se realiza con elementos interpuestos. La matriz de tensión-deformación está definida por el módulo de rigidez, E_s , el módulo de compresión, E_n y el módulo de "rotación", E_ω . Asumiendo que el momento en la superficie de interacción resulta en una distribución de tensión lineal normal, los módulos de "rotación" y de compresión están relacionados por:

$$E_\omega = \frac{E_n \cdot l^3}{12}$$

por tanto, sólo se requieren dos módulos básicos, E_s y E_n para describir la deformabilidad del elemento.

La resistencia cortante de un elemento interpuesto está definida por la ecuación de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi_e$$

donde:

τ_f es la resistencia cortante del material interpuesto,

c es la cohesión del material interpuesto,

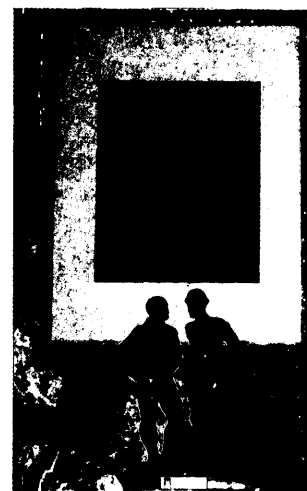
σ_n es la tensión normal efectiva aplicada sobre la superficie interpuesta, y

φ_e es el ángulo de fricción equivalente del material interpuesto.

■ Resultados del análisis de elementos finitos

El mayor problema que se presentó para modelar el macizo rocoso alrededor de la caverna fue el de tener en cuenta de forma realista el sistema de juntas.

Detalles nunca serán revelados antes de la excavación. No debe olvidarse que cuando se introduce un sistema de juntas en un modelo matemático, se está trabajando a nivel de una estimación.



Placa conmemorativa de la inauguración: homenaje a los trabajadores.

Tabla 3. Resultados del Análisis de elementos finitos

Elemento de la malla	Cobertura de la roca (m)	Módulo de elasticidad (GPa)	k _o	Tensión Horizontal en clave de bóveda (MPa)		Desplazamientos verticales en clave de bóveda (mm)	
				Fase 2	Fase 3	Fase 2	Fase 3
1	48	51.5	2.13	3.02	3.61	1.9	1.8
				4.38	5.16	7.9	6.7
2	28	51.5	2.13	1.61	2.06	1.8	1.6
				2.58	2.98	7	5.9
3	48	10	2.13	3.09	4.04	15.9	18
		10	2.77	3.99	5.62	15.2	20.4
		30	2.77	4.2	6.14	8.6	12.2
4	28	10	2.13	1.81	2.41	11	12.6
		10	2.77	2.31	3.26	11.5	14.1

Fuente: C. Athanasiu; P. Heimli. "Finite Element Analysis of Gjøvik Olympic Mountain Hall".

El macizo rocoso con el sistema de juntas se modeló de dos formas diferentes:

- a) como un continuo elástico lineal homogéneo para el que los parámetros elásticos reflejarían el comportamiento de la roca intacta y el sistema de juntas variando el módulo de Young
- b) como un modelo mixto con elementos de roca intacta y con un sistema de elementos interpuestos.

Los resultados del análisis de elementos finitos son resumidos en la Tabla 3.

■ Comparación entre los desplazamientos previstos y los observados

El análisis de elementos finitos mostró que la estabilidad de la caverna era satisfactoria, tanto con respecto a las tensiones inducidas como a los desplazamientos, sin la utilización de ningún tipo de refuerzo en la roca. Pese a ello, dadas las excepcionales dimensiones de la excavación, se decidió en los comienzos del proyecto que debería realizarse una auscultación de los desplazamientos.

En todo caso es importante distinguir entre juntas ocasionales y sistemas de juntas persistentes que causan un comportamiento anisótropo del macizo rocoso.

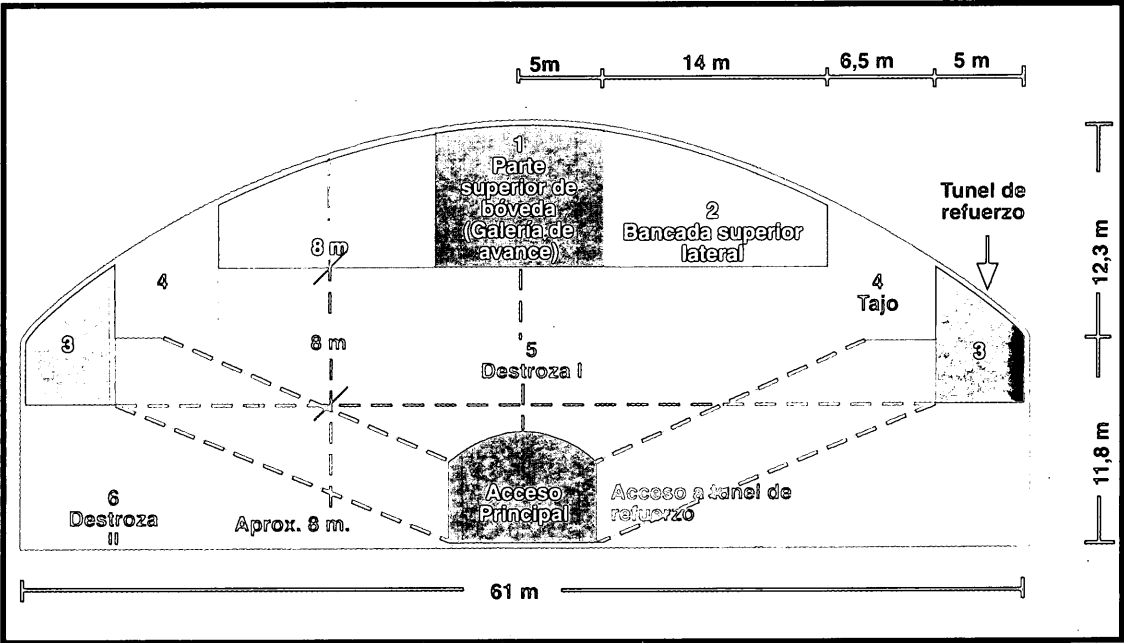
Como se muestra en la Tabla 3 el análisis pre-dijo desplazamientos bastante pequeños sobre el techo de la cueva, del orden de 2-20 mm., dependiendo del parámetro elegido. El modelo de siste-

ma de juntas parece ser más conservador ya que los deslizamientos de los bloques a lo largo de las juntas generan mayores desplazamientos verticales.

La aproximación continua muestra un mejor acuerdo entre los desplazamientos observados y los previstos.

Durante la construcción de la Caverna de Gjøvik las deformaciones de la roca fueron continuamente medidas, y se comprobó un desplazamiento vertical de la bóveda rocosa de entre 8 y 10 mm., lo que se corres-

Secuencia de excavación. Sección.



pondría dentro de márgenes razonables con los resultados obtenidos mediante el modelo matemático.

Método constructivo y medidas medioambientales

La excavación de los aproximadamente 130.000 m³ de roca, incluyendo la caverna y las galerías y túneles interiores y de acceso se llevó a cabo por el sistema tradicional de voladuras y extracción de escombros.

Se necesitaron varios puntos de ataque para poder excavar la caverna de forma racional; una presentación esquemática de la secuencia de excavación, tanto en planta como en sección, se muestra en las figuras....

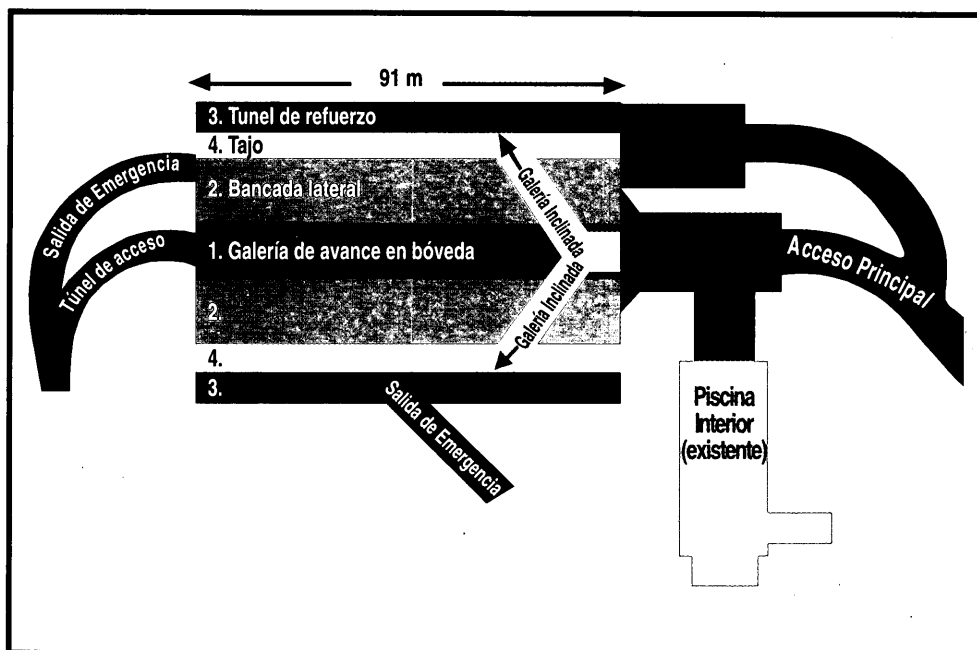
Se partió de la excavación de un túnel de acceso posterior, desde el lado sur de la colina, de 22 m² de sección que llegó hasta la parte superior de la caverna; una vez en el área de la caverna la sección del túnel se amplió hasta unos 80 m², con 10 m. de anchura y se excavó a lo largo del eje central de la caverna constituyendo la galería de avance en bóveda hasta llegar, en el extremo opuesto, a la sala de ventilación.

Este túnel hizo las veces de galería piloto y en él se efectuaron numerosas tomas de muestras y ensayos geológicos al objeto de correlacionar la calidad de la roca derivada de los reconocimientos previos con las condiciones reales, encontrándose una buena correspondencia.

Después de excavar la galería de avance o túnel piloto fue perforándose de forma simétrica y gradual la bóveda de la caverna mediante bancadas laterales superiores, situándose un frente aproximadamente dos ciclos completos de excavación con explosivos por delante del otro.

De esta forma se amplió y ensanchó el túnel piloto desde los 10 m. originales hasta un total de 38 m. Nótese que ya en ese momento, con la excavación a media sección incompleta, la caverna parcial era una de las mayores del mundo.

Al tiempo que se perforaba la parte superior de la caverna se excavaba la entrada principal al



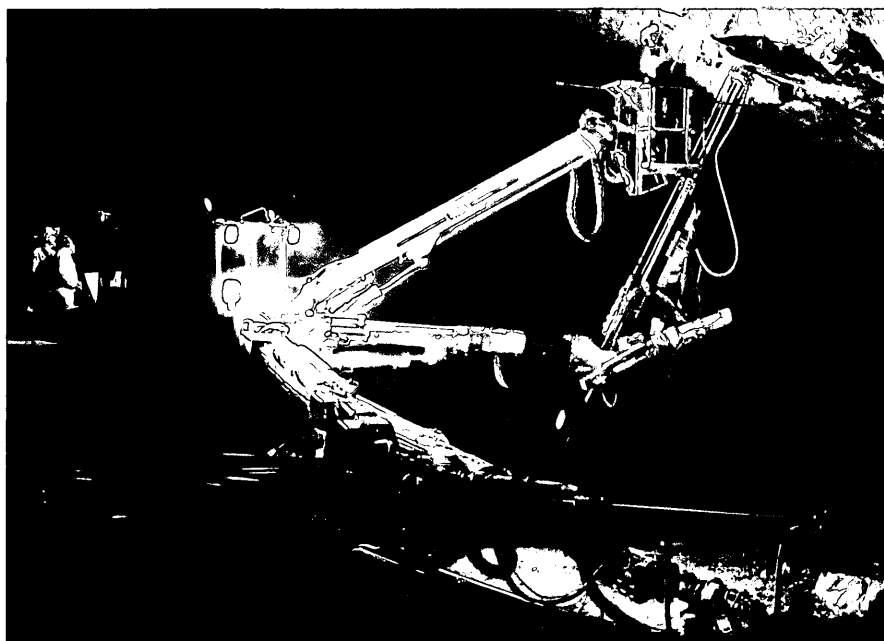
Secuencia de excavación. Planta.

recinto desde Roverdalen desde un nivel inferior; una vez que el túnel que constituiría la entrada principal llegó al área de la caverna se dividió en dos túneles separados que fueron ascendiendo hasta llegar a los muros laterales de la caverna. Desde allí fueron excavados a lo largo del muro extremo de la caverna en toda su longitud (número 3 en el esquema).

La voladura de los restantes pilares (número 4 en el esquema) entre los túneles de refuerzo y la abertura central de 38 m. de luz en el centro de la

Panorámica de la Caverna en fase de destroza.





Trabajos de bulonado utilizando un AMV-Jumbo.

caverna resultó una experiencia muy intensa, con mucha reputación en juego.

Excavada la caverna a media sección quedaba la destroza que se realizó mediante dos bancadas verticales con alturas comprendidas entre 6 m. y 8 m. En cada ciclo completo se extrajeron, como media, 1.700 m³ de roca.

■ Sostenimiento de la roca

Inmediatamente después de cada ciclo completo de voladura se aplicó un refuerzo con bulones de 3 m. y 4 m. con anclaje tensionado.

La instalación de los bulones de 6 m. y la aplicación de la primera capa de hormigón proyectado

do para sostenimiento permanente se inició después de que el túnel piloto fuese excavado en su totalidad al objeto de permitir que la roca se ajustase a la nueva situación de tensiones.

Además de la pauta sistemática de bulonado se practicó un bulonado puntual esporádico allá donde fuese necesario.

Durante la excavación de las bancadas superiores laterales (número 2 en el esquema), el refuerzo sistemático de la roca con bulones de 6 m. y hormigón proyectado se efectuó entre 1 y 2 semanas después de la voladura del frente. La instalación de los cables de acero de 12 m. se inició una vez que se logró excavar los 61 m. de luz de la bóveda.

Una vez que se instalaron en la bóveda todos los bulones especificados, se aplicó la segunda capa de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero.

Durante la destroza se aplicó el siguiente sistema de sostenimiento: bulones inyectados y cables de 3 m., 5 m. y 10 m. de longitud combinados con una capa de 10 cm. de hormigón proyectado con fibra de acero.

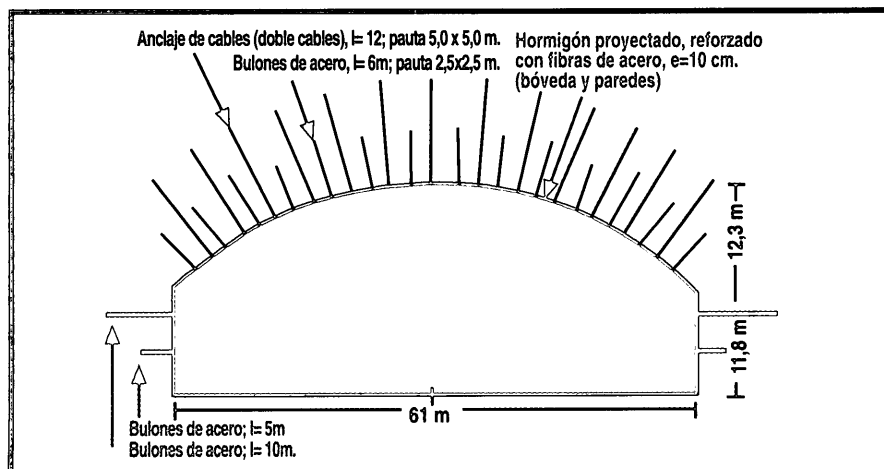
Todo el proceso constructivo fue controlado muy de cerca por ingenieros especializados en mecánica de rocas que registraron de forma continua y sistemática las condiciones geológicas.

La cantidad de cargas y la distribución de detonadores se colocó de acuerdo con el criterio normal para las ondas de choque en las casas e instalaciones de los alrededores. Las vibraciones fueron vigiladas de forma continua y las casas cercanas se estudiaron en detalle antes de empezar el trabajo.

A destacar el esfuerzo realizado en materia de auscultación de la caverna, que tenía una doble finalidad: primero, identificar cualquier posible zona de inestabilidad a gran escala en el macizo rocoso sobre la caverna; segundo, controlar los desplazamientos calculados. A tal fin se utilizaron extensómetros de varilla y un micrómetro deslizante.

Una explosión con una duración de 6 segundos fácilmente movía 150 toneladas de roca. Esto se tenía que repetir varias veces sin tener que evacuar a la gente de la ciudad. Todas las estruc-

Esquema del sistema de sostenimiento permanente en la roca.



turas en la superficie permanecieron intactas, incluida la pequeña casa cerca de la entrada que ha llegado a hacerse famosa. Pero no sólo esos ruidos y molestias eran soportados por la población: unas 29.000 cargas de camiones pasaron por Storgata, la calle comercial principal, lo que causó numerosos obstáculos, ruido, polvo y tierra.

Los escombros fueron utilizados para llenar un vertedero industrial en la orilla del Lago Mjøsa, que ha sido transformado en un parque de recreo. Esto sirvió para calmar las críticas locales.

■ **Medidas medio-ambientales**

Cuando se decidió contruir la Caverna Olímpica de Gjøvik, el municipio puso gran énfasis en las cuestiones de carácter medioambiental, que se incorporaron al proyecto.

Una ventaja arquitectónica de esta construcción era que no eclipsaba las pintorescas casas del centro de la ciudad.

A su vez, el material de roca que había sido extraído mediante voladura fue un importante recurso a reutilizar ya que una parte del volúmen se utilizó para hacer un paseo y un parque a lo largo del lago Mjøsa, recuperando la abandonada playa de Gjøvik.

Diseño de Instalaciones

■ **Arquitectura**

Con sus nueve pisos y una superficie en planta que cubriría una manzana completa del centro de la ciudad, este tipo de pabellón de deportes estaría completamente fuera de lugar en un pequeño municipio con edificios de 1-2 plantas.... si no fuera porque está a 120 metros bajo una montaña.

Desde el exterior, la entrada, discutida, a la vez original y discreta; desde allí arranca “la garganta que absorbe” a los visitantes hacia el interior. Los primeros cien metros del túnel de acceso principal ponen de manifiesto que se trata de un lugar especial, bajo tierra: texturas, colores, contrastes de luces y sombras, humedad, confinamiento y amplitud de espacios; el vestíbulo muestra los intestinos de los grandes conductos de aire

Tabla 4. Principales características del Proceso Constructivo

PERFORACION CON EXPLOSIVOS

Volúmen medio de roca excavado en un ciclo completo	1.700 m ³
Máxima voladura por bancadas	2.800 m ³
Número total de voladuras por bancadas	42
Consumo medio de explosivos.....	1,2 Kg/m ³

SOSTENIMIENTO DE LA ROCA

Espesor medio de hormigón proyectado en bóveda.....	9,8 cm
Resistencia media de trabazón entre el hormigón proyectado y la roca	5,3 m ²
Superficie cubierta por cada bulón en la bóveda	4,2 m ²
Superficie cubierta por cada bulón en los muros	0,85 Mpa

VIBRACIONES POR VOLADURAS

Valores máximos admisibles:	
-Centro de Telecomunicaciones	20 mm/s
-Piscina subterránea	30 mm/s
-Otros	50 mm/s

y, ya rebasada la entrada, el palacio de deportes que se nos ofrece con discreción y armonía y en el que las referencias a lo subterráneo son mínimas.

Se ha diseñado un armonioso y clásico anfiteatro, proporcionando un cercano contacto entre los espectadores y los jugadores.

La gunita proyectada sobre las paredes de la caverna es oscura y misteriosa. El alumbrado permite contrastes, desde la entrada del túnel que está medianamente oscuro hasta la caverna misma repleta de luz, reforzando sus enormes dimensiones.

La elección de materiales y colores vino también determinada por la roca; así, la magnífica roca roja, que es visible sólo en unos pocos lugares, fue la base para la elección del rojo como color principal.

El contraste entre la oscura, accidentada y pesada roca y el brillo, exactitud y claridad de los revestimientos de aluminio del pabellón han sido también utilizadas deliberadamente: un contraste entre lo natural y la tecnología.

■ Fuego y Seguridad

En principio, las construcciones subterráneas para uso público son básicamente peligrosas en caso de incendio, ya que son esencialmente espacios cerrados con vías de escape escasas y de largo recorrido.

Se llevan a cabo investigaciones en el sentido de lograr un mejor diseño de las rutas o vías de escape en términos de iluminación, geometría, colores, ventilación, etc.

Los criterios de número y anchura que se aplican para construir las salidas de incendio en una construcción subterránea no pueden ser los mismos que en una al aire libre, y ello es debido a razones geológicas y económicas. Por ésto, para conseguir el mismo grado de seguridad que en los edificios a cielo abierto, se establecen unas "áreas de seguridad" dentro de las instalaciones subterráneas; estas áreas de seguridad deben, bajo cualquier circunstancia, mantenerse libres de humos o de infiltraciones de humo y su capacidad, en términos de personas/m³, debe estar en concordancia con el número de ocupantes que puede albergar el interior de la instalación.

En la Caverna Olímpica de Gjøvik este área de seguridad está localizada fuera de la zona del público, en el vestíbulo de acceso al pabellón y en los pasillos exteriores alrededor de las gradas del público. En esta zona no se permite la utilización o almacenamiento de materiales inflamables o combustibles, lo que unido al sistema de control automático del humo en caso de incendio asegura que aquel nunca podrá infiltrarse en la zona de seguridad.

Cuando el control automático de humos de la zona destinada al público está activado, el humo es extraído desde el techo. El propio diseño de los accesos abiertos garantiza una distribución uniforme del flujo de aire desde los túneles de entrada a través de la zona de seguridad hasta la zona del público.

Los sistemas de ventilación de humos pueden, en general, ser diseñados como una parte del sistema convencional de ventilación. Sin embargo, para hacerlo, se necesita información sobre los principales parámetros que describen el escenario del fuego, por ejemplo, la producción estimada de humo (m³/s). Desafortunadamente, teniendo en

cuenta la geometría, localización y volumen de aire de los estadios subterráneos hay escasos códigos o especificaciones para la seguridad ante el fuego, incluyendo el control del humo.

En el Pabellón subterráneo de Gjøvik se estudió el movimiento de humos y se optimizó el diseño del sistema de control de humos mediante cálculos con modelos de zona y simulaciones computerizadas de dinámica de fluidos. Se analizaron situaciones de fuego en la zona del público o en la pista. El modelo del calor liberado se realizó con métodos aproximados aplicando parámetros obtenidos de mediciones a escala real y con métodos normalizados de comprobación en laboratorio.

Se dió gran prioridad a la seguridad en el Pabellón Olímpico de Gjøvik, estableciéndose, entre otras, las siguientes medidas para proteger la seguridad personal en caso de incendio:

- La elección de materiales fuegoretardantes
- Secciones de fuego
- Rutas de escape exentas de humo
- Dimensionado adecuado de entradas y salidas de incendio
- Zona de seguridad alrededor de las gradas de espectadores

Se han realizado pruebas en las que el público puede evacuar el espacio de las gradas en 3 minutos; en otros 5,5 minutos la gente puede alcanzar la salida principal y tres salidas de emergencia.

■ Otras instalaciones

El sistema de ventilación proporciona suficiente aire fresco para un higiénico cambio del aire en la sala principal, oficinas, vestuarios, etc.; controla la temperatura y la humedad relativa del aire en la sala principal y proporciona rutas de escape del humo en caso de incendio.

La capacidad total del sistema de ventilación es de 160.000 m³/h, calculado en base a una afluencia de 5.200 espectadores, además de los deportistas participantes y un nivel de iluminación en la superficie de hielo de 1.600 lux. La temperatura ideal en el recinto oscila entre los 10°C y los 16°C.

La toma y evacuación de aire se localiza en la cima de la colina, habiéndose perforado cuatro pozos verticales de 1,80 metros de diámetro cada uno y de 32 metros de profundidad que conectan con la sala de ventilación situada al nivel del techo del vestíbulo principal. Una vez precalentado, el aire acondicionado es suministrado al corredor en la primera planta bajo las tribunas y fluye a través de las entradas hacia el Pabellón. El aire utilizado es extraído a través de un sistema de conductos situados bajo el techo.

También han de mencionarse el sistema para hacer hielo, el sistema de calefacción, los dispositivos para reducir el consumo energético- como el condensador de calor-, las instalaciones eléctricas y de iluminación así como los sistemas de telecomunicación.

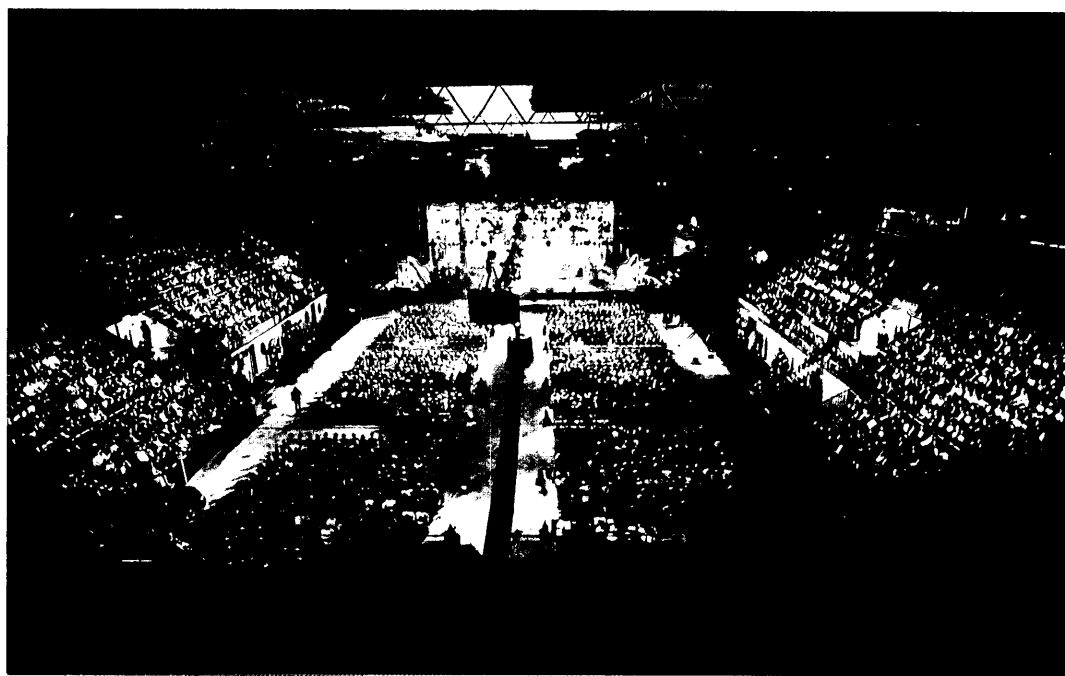
Por último, ha de indicarse que esta red de galerías y cavernas no sólo tiene utilidad para fines lúdicos y culturales sino que, en caso de guerra o emergencia puede ser utilizada como refugio público para una capacidad de 2.000 personas; de acuerdo con las regulaciones de la Defensa Civil las diversas dependencias están protegidas contra los efectos de armas convencionales y nucleares además de ante el ataque con gases tóxicos.

Experiencia práctica de uso de la Caverna de Gjøvik

La ceremonia de apertura de la Caverna Olímpica de Gjøvik tuvo lugar el día 6 de mayo de 1.993, y fue celebrada con un gran show televisado. La Ministra de cultura, Ase Kleveland, hizo el discurso de apertura y estuvieron presentes en el acto el Rey Harald, la Reina Sonja y el Presidente del Comité Olímpico Noruego, Gerhard Heiberg.

Artistas locales, nacionales e internacionales contribuyeron a la celebración más grande del mundo en una caverna subterránea.

La Caverna atrajo la atención mundial durante las Olimpiadas de Invierno en febrero de 1.994,



La Caverna Olímpica de Gjøvik en su ceremonia de apertura.

sirviendo de escenario para 16 partidos de hockey sobre hielo, incluyendo dos cuartos de final y una semifinal.

Los comentarios tanto de los aficionados que se dieron cita en la montaña horadada como de los deportistas participantes y de los periodistas acreditados fueron muy favorables, no registrándose casos de personas que experimentaran ninguna sensación de claustrofobia. La Caverna se convirtió en un punto de encuentro acogedor, de temperatura mucho más benigna que "fuera de la roca".

Tuve ocasión de cambiar impresiones con algunas personas de Gjøvik y me quedé con la impresión de que tras una fase inicial en que el escepticismo era nota dominante, la Caverna fue ganando el respeto y la admiración de unos ciudadanos que en buena medida se sienten orgullosos de esta obra singular.

Entre los efectos derivados de la construcción de la Caverna Olímpica de Gjøvik pueden enunciarse, entre otros, los siguientes:

- Aumentaron las oportunidades para todo tipo de encuentros.
- Se creó un nuevo centro de proceso de datos para los Servicios Postales.
- El paseo Mjos se hizo con rocas tomadas de la Caverna Olímpica.

- La calle Storgaten se hizo peatonal.
- Una nueva carretera comunica el centro de la ciudad.
- Aumento del turismo: el número de estancias hoteleras se ha incrementado en un 70 por ciento.

El Programa Integral de Investigación y desarrollo

Una componente muy importante del proyecto, diseño y construcción de la Caverna Olímpica de Gjøvik fue la puesta en marcha y el desarrollo del programa de investigación "Stadium-Caverna en roca".

La investigación es dirigida por un comité de dirección formado por representantes de todas las empresas y entidades implicadas en el proyecto de la Caverna de Gjøvik.

El Programa se ha articulado en torno a las siguientes áreas clave:

- Ventilación, energía, fuego y seguridad
- Medio ambiente, seguridad y documentación
- Mecánica de rocas e ingeniería geológica
- Códigos y regulaciones

Entre sus objetivos se incluye también la publicación de los resultados de las investigaciones llevadas a cabo en relación con el diseño, y construcción de la Caverna Olímpica.

Conclusiones

La Caverna Olímpica construida cien metros en el interior de la colina Hovdetoppen es mucho más que un Palacio de Deportes Subterráneo en el que poder practicar o presenciar partidos de hockey sobre hielo.

Sus posibilidades como recinto acogedor de actividades deportivas y culturales, de exhibiciones, festivales y conferencias son espléndidas. Además, la excelente acústica del recinto permite su utilización para conciertos.

Esta obra tiene otra utilidad, la de demostrar las posibilidades del espacio subterráneo para uso público, tanto en el plano del alto nivel tecnológico alcanzado por la ingeniería en la roca, fulminando records que parecían imbatibles, como

en aquel de la diversificación de usos y funciones de carácter público, en donde la persona puede desenvolverse en condiciones de confort y seguridad.

En la Gruta del Rey de la Montaña Edvard Grieg evoca la terrible aventura con los temibles duendes de las tierras noruegas; sin embargo, adentrarse en la Caverna Olímpica de Gjøvik resulta una aventura fascinante y profunda.

Bibliografía

- Athanasiau, C.; Heimli, P.** "Finite Element Analysis of Gjøvik Olympic Mountain Hall". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Barton, N.; Hansen, S.E.** "Rock Engineering Investigations for the Prediction of Performance of the Gjøvik Olympic Mountain Hall". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Bergthun Hanssen, G.** "The Planning and Design". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Bjorke, T.** "Experience from the Use during the XVII Olympic Winter Games". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Bollingmo, P.; Heimli, P.; Morseth, B.R.** "Engineering Geological Investigations and Construction Supervision". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Jensen, P.; Kristiansen, J.; Moger, J.** "Rock Blasting Techniques and Vibration Monitoring for the Excavation of the Gjøvik Rock Cavern Stadium". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Meland, O.** "The Integrated Research Programme 'Rock Cavern Stadium' ". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Rygh, J.A.** "Why go Underground? The background for the decision". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.
- Skogly, O.** "Gjøvik Olympic Mountain Hall, Construction work". International Symposium on Underground Openings for Public Use. Gjøvik. Noruega. 1994.

Agradecimientos

Mi especial reconocimiento a Johannes Hope (NFF, Asociación Noruega de Túneles), Bjorn Fuhre (Selmer A.S.) e Inocencia Infantes.■