



Trabajos en ambientes hiperbáricos Buceo y trabajos en aire comprimido en tuneladoras

Por debajo de una profundidad de 40 metros (equivalente a una sobrepresión de 4,0 bar) los buzos entran en una zona donde ya no resulta efectivo llevar a cabo trabajos en ambientes hiperbáricos bajo las condiciones tradicionales. Dado que la próxima generación de túneles se proyectarán cada vez más largos y a mayor profundidad, era sólo cuestión de tiempo y ocasión el destinar buceadores a los trabajos hiperbáricos.

El elevado nivel de agua subterránea en el frente es un gran desafío en la perforación de túneles en terrenos blandos y roca débil. Tiene gran impacto en el proyecto y el manejo de las tuneladoras para prevenir el flujo excesivo de agua de fondo, asegurar la estabilidad del frente y permitir el acceso a la rafadora para su mantenimiento, lo que puede aumentar el tiempo de construcción y el presupuesto. Los responsables de los proyectos deberían considerarlo a la hora de planificar el alineamiento de un túnel.



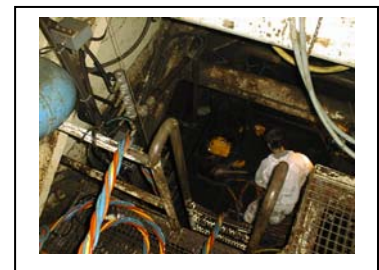
El 4º Túnel del río Elba fue un hito en la perforación con tuneladoras de lodo debido al enorme diámetro de la tuneladora de 14,2 m, una cobertura muy baja de 7 m y una presión del agua subterránea de hasta 4,5 bar. La sección sur del túnel de 2.561 m de longitud se excavó en depósitos glaciares consistentes en arena, marga, cantos rodados, mientras que en la sección norte del túnel había un suelo más cohesivo, como marga y lodo con arena cristalina y cantos rodados.

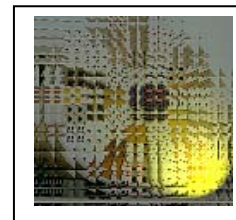


Debido a la presencia de suelos abrasivos se hicieron necesarias frecuentes intervenciones de mantenimiento de la rafadora. Se observó severo desgaste en las herramientas de excavación y en la parte trasera de la rafadora. Fue necesaria una reparación a unos 50 m del punto en el que se alcanzó el mínimo de cubrimiento. Aquí se tuvo que parar la tuneladora para poder de nuevo soldar los soportes de las cámaras y cambiarlas. Esta misión en aire comprimido llevó aprox. 6 semanas bajo presiones de hasta 4,5 bar.



Se destinaron en total 10.920 horas de trabajo en aire comprimido en presiones de hasta 4,5 bar, durante las cuales se realizaron 2.738 intervenciones, de ellas 237 en presiones superiores a 3,6 bar. En total se dieron 21 casos de enfermedad de descompresión, todos ellos a presiones inferiores a 3,6 bar.





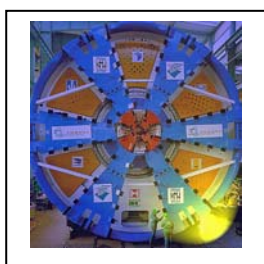
El 4 Túnel del río Elba fue el primer proyecto en el que se hubiera podido llevar a cabo un rescate conectando una brida NATO a la esclusa de aire comprimido en la tuneladora, permitiendo así el traslado de los accidentados a la superficie con los transbordadores de transporte presurizado. Afortunadamente no fue necesario su uso.



La doble galería del **Wesertunnel** de 1.640 m de longitud, cruza el río Weser al norte de Bremen (Alemania). Una tuneladora de lodo (\varnothing 11,71 m) se usó para excavar el túnel en los depósitos glaciares. El suelo glaciar consiste en una cohesión de poca calidad y parcialmente muy suelta, menos arena con cantos rodados de granito y arcilla entre muy blanda y blanda y turba en áreas superficiales. Bajo el río, se hallaron arcillas que se habían endurecido alcanzando fuertes valores de roca blanda.

El punto más profundo del túnel estaba a 40 m por debajo del nivel del mar. Debido a la influencia de las mareas del Mar del Norte, el nivel normal del río era +/-2 m sobre/bajo el nivel del mar y alcanzaba un máximo de +5,2 m sobre el nivel del mar. A lo largo de la ruta del túnel el agua de fondo en el frente hallada oscilaba entre 2,5 y 4,0 bar y alcanzaba en marea de tormenta un máx. 4,5 bar.

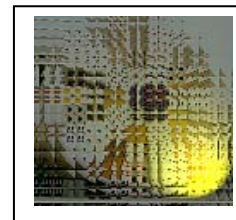
El mantenimiento bajo aire comprimido se hizo a un presión de hasta 4,5 bar para obras en la rafadora y hasta 5 bar en el quebrantador de piedras. Buzos adicionales se destinaron al trabajo en bentonita bajo presión de hasta 5 bar. Se usaron con éxito aire comprimido normal (no gases mixtos) y descompresión de oxígeno. En total se hicieron 5.000 horas de trabajo en aire comprimido y 1.400 intervenciones, 600 de las cuales bajo presiones de más de 3,6 bar. Sólo se dieron 15 casos leves de enfermedad de descompresión, todos ellos a presiones inferiores a 3,6 bar.



El **Túnel Westerschelde** de 6,6 km es el primer proyecto en el que se aplicaron técnicas de buceo en saturación para excavar las galerías. El doble túnel fue excavado con dos tuneladoras de lodo (\varnothing 11,33 m). El suelo consistía en arenas cuaternarias de consistencia entre medianas y finas en secciones superficiales y una formación masiva de arcilla rígida de una longitud de aprox. 2 km. Densas arenas superficiales se hallaron bajo el lodo en la zona más profunda del túnel.

El punto más profundo del túnel está a una profundidad de 60 m bajo el nivel del mar. El nivel del agua era normalmente entre +/- 2.5 m sobre/bajo el nivel del mar y alcanzaba algo como +4,0 m en total. La cobertura del túnel estaba en un ámbito de entre 28 m a 40 m.

Cuando se le preguntó a Nordseetaucher GmbH si quería cooperar en un proyecto de construcción de dos túneles bajo el río Westerschelde en los Países Bajos, no lo dudamos ni por un instante, sabiendo que sería una oportunidad ideal para poner en uso las habilidades y la experiencia adquirida en los proyectos de la cuarta galería del túnel del río Elba y del Wesertunnel.



Ello no obstante, los problemas que podíamos esperar eran de una escala sensiblemente diferente. En el Túnel Elba trabajamos con presiones de hasta 4,5 bar, mientras que los trabajos en el Túnel Wesser se ejecutaron con 5,0 bar. Las instrucciones del proyecto de los dos túneles Westerchelde requerían trabajar a presiones de hasta 8,5 bar.

Es imposible trabajar con aire comprimido a presiones de hasta 8,5 bar, porque el nitrógeno presente en la respiración causa narcosis. Por ello desde el principio planificamos el trabajo usando gases mixtos.

Durante décadas, algunos métodos y procedimientos se habían probado y aplicado en el buceo comercial internacional de ultramar, que también podían ser usados en la construcción mecánica de túneles ejecutados en presión hiperbárica superior a 5,0 bar. Por ejemplo, el uso de gases mixtos, que son una mezcla de oxígeno y varios gases inertes, mezclados de acuerdo con el espectro específico de presión para permitir a los buzos trabajar durante días e incluso semanas bajo condiciones presurizadas (método saturado). Con el método saturado es posible trabajar en aire comprimido a presiones hiperbáricas de entre 3,0 y 6,0 bar y de hecho puede llegar a ser el método de mayor preferencia en el futuro. Para usar los gases mixtos sin riesgos y con éxito, se requieren preparativos en la tuneladora y procesos logísticos meticulosos.

Debido al poco espacio libre sobre el túnel, hubiera sido peligroso bajar el nivel de la bentonita en la cámara de la rafadora. Así pues, personal especialmente entrenado estaba a mano para inspeccionar y cambiar herramientas en caso que fueran necesarios trabajos de mantenimiento y reparación.

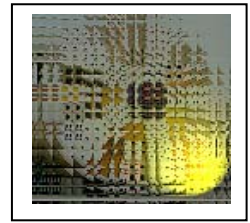
Se hicieron un total de 6 intervenciones en saturación con un total de tiempo en saturación de 40 días. El tiempo de descompresión fue en cada ocasión de 4 días. Se realizaron 10 inspecciones con gas mixto además de las 1.652 h en aire comprimido conllevando 546 transbordos. Se dieron 5 casos de enfermedad de descompresión, que se pudieron tratar exitosamente in situ en la cámara hiperbárica.

Buceo en Bentonita

Preparativos

Para realizar trabajos de buceo en bentonita, se instalaron conexiones de bridas especiales en las paredes de presión del túnel de las tuneladoras. Estas conexiones garantizan el suministro a los buceadores de aire respirable, aire de reserva, comunicación, luz, transmisión de vídeo y datos, así como agua de limpieza para los reguladores de aire en los cascos del buzo.





Los cascos de buceo



Los cascos usados normalmente para el buceo en ultramar fueron modificados para permitir su uso en bentonita. Para facilitar a los buzos la respiración en la bentonita, que es una suspensión de arcilla, y para reducir la resistencia a la respiración, el casco se equipó con un sistema de limpieza de agua para el regulador de oxígeno. Además, el agua fresca previene que las membranas de respiración se peguen unas a otras.

El umbilical

Como su nombre indica, el umbilical es el salvavidas del buzo. Consiste en diversos tubos de distintos colores a través de los cuales se suministra aire, aire respirable de emergencia y agua fresca, además de contener cables de comunicación, iluminación y transmisiones.



Bucear y trabajar en atmósferas de saturación

La cámara vivienda

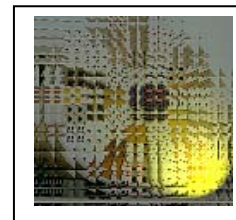
El buceo en saturación supone vivir y trabajar en ambientes hiperbáricos durante largos períodos de tiempo, que pueden alcanzar los 28 días, aunque los límites no se hayan probado del todo. Para posibilitar que los buzos e ingenieros sobrevivan y trabajen bajo estas condiciones, se requiere una cámara presurizada situada fuera del túnel con habitaciones. En este sistema pueden llegar a habitar hasta 9 buzos e ingenieros y tiene todo lo necesario, desde literas hasta aseos y duchas.



El transbordador

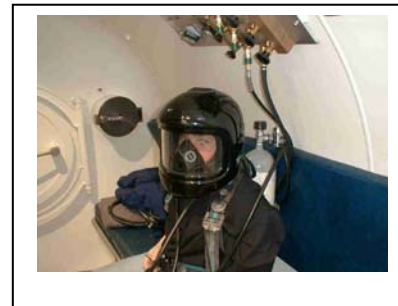


Debido a razones técnicas e higiénicas no es factible colocar la cámara habitable en la zona del túnel y unirla a la tuneladora. Por eso construimos un sistema de transporte móvil: el “shuttle”. Este transbordador hace posible recoger a los buzos de sus cámaras habitables situadas fuera del túnel, llevarlos al túnel y acoplar el “shuttle” a la tuneladora. Cada transbordador presurizado puede transportar a cuatro personas. Tan pronto el transbordador se acopla a la tuneladora, los pasajeros desembarcan y se dirigen a sus puestos en la cámara de control y la rafadora, para llevar a cabo los trabajos de inspección, mantenimiento y reparación en la rafadora que sean necesarios.



Los cascos hiperbáricos

Contrariamente a los proyectos 4ª Galería del río Elba y Wesertunnel, con presiones superiores a 4,5 y 5,0 bar, en el proyecto Westerchelde no pudimos trabajar con aire comprimido. En cambio, utilizamos gases mixtos, formados por helio, nitrógeno y oxígeno. El equipo para buceadores era el mismo que ya se había usado en otros proyectos. El trabajo parcialmente sumergido en Westerchelde se hizo con un nuevo casco, más ligero, que se utiliza en la industria química. Estos cascos, que no se pueden conseguir en el mercado, fueron reequipados y adaptados para esta labor. Todas las pruebas y ensayos necesarios antes de su empleo se realizaron en el Centro Hiperbárico de la Marina Belga en Zeebrugge. Dicho casco dispone de dos reguladores de aire respirable y un sistema dirigible de refrigeración, siendo este último esencial, ya que en el frente se alcanzan temperaturas de hasta 50°C.



Este nuevo casco diseñado por Composite Beat Engel en estrecha colaboración con Nordseetaucher GmbH, es un casco de sobrepresión operativo en ambientes extremadamente peligrosos, tales como tuneladoras y con un equipamiento adicional, se puede transformar en sólo una hora en un casco de respiración controlada. Cada casco viene con conexiones para suministro en superficie de aire/gas, una conexión independiente de emergencia aire/gas y equipo de comunicaciones.



El **Nanjing Yangtze River Crossing Tunnel** es un túnel doble de 2.990 m de longitud que cruza el río Yangtze en Nanjing, China. Dos tuneladoras de lodo (Ø 14.96 m) están excavando el túnel en terreno blando de depósito aluvial. La capa consiste principalmente en sedimentos y arena fina.

El punto más profundo del túnel se halla a 65 m bajo el nivel del mar. El nivel normal del agua en el río oscila entre +/-1,5 m sobre/bajo el nivel del mar.

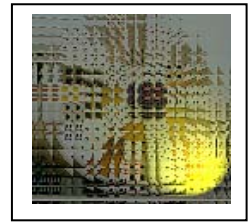


En este proyecto el principal trabajo consiste en el soldeo en aire comprimido. Con nuestra investigación y experiencia en soldadura, tanto en aire comprimido como bajo el agua, ello no tenía porqué ser un problema. Sólo que este caso resultaba relativamente complicado ya que se tenían que sustituir las palas de seis brazos de la tuneladora. Para ello hemos soldado nuevos soportes en los brazos laterales de la rafadora. Eso nos ha llevado trabajar día y noche durante más de doce semanas en una sobrepresión de hasta 5,4 bar. Para mantener estable la presión de soporte utilizamos bentonita con una mezcla especial

de alta densidad y viscosidad.

NORDSEETAUCHER GmbH

Hyperbaric Tunnel Construction and Diving®



Los trabajos de mantenimiento y reparación se han efectuado en presiones de hasta 5,4 bar en la rafadora y hasta 6.5 bar en el quebrantador. Se han utilizado exitosamente aire comprimido regular (no gases mixtos) y descompresión de oxígeno. En total se han hecho 4.000 horas de trabajo en aire comprimido y 850 intervenciones. Solamente se han reportado 3 casos leves de enfermedad de descompresión..

Para los trabajos de soldadura hemos usado por vez primera un nuevo casco especialmente diseñado para aire comprimido con: triple suministro de aire, dos con reguladores y uno con fluido libre; comunicación; y un protector integrado para soldadura con sensores



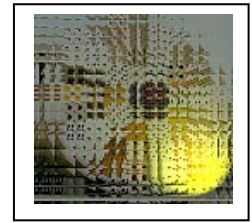
Resumen

La presión del agua subterránea (sobre 4 bar) dificulta la perforación de túneles y requiere conocimientos especiales de tecnologías de corte a la hora de proyectar y construir.

Para poder contrarrestar la acción del agua del frente, las tuneladoras, el equipamiento y los procedimientos deberían pensarse para permitir una aplicación fiable de las presiones de soporte durante la excavación e intervenciones hiperbáricas.

NORDSEETAUCHER GmbH

Hyperbaric Tunnel Construction and Diving®



Si en la tuneladora no se instalan los componentes básicos adecuados y sistemas de asistencia, se corre el riesgo de que surjan problemas importantes, incluyendo aumento de los costes presupuestados y dilaciones.

La excavación de túneles en terrenos fuertes con suelos cohesivos finamente granulosos y roca bajo presión alta del agua subterránea no supone generalmente un problema para las tuneladoras EPB y tuneladoras de lodo, ya que normalmente el frente es estable y la cantidad de agua fluyente es baja debido a la poca permeabilidad del suelo.

En suelos granulosos ásperos o rocas inestables, la excavación de túneles requiere un soporte activo en el frente que sea fiable, para darle estabilidad y prevenir la pérdida excesiva de terreno durante la perforación y las intervenciones. Un adecuado soporte del frente es más fácil de conseguir con las tuneladoras de lodo.

Dependiendo de la presión del agua subterránea, lo abrasivo del suelo y la longitud de las secciones del túnel, la tuneladora debería incluir abastecimientos para intervenciones hiperbáricas utilizando aire comprimido normal, gases mixtos o saturación, teniendo en cuenta el nivel de la presión y la duración prevista de las intervenciones.

El riesgo de intervenciones sin presión bajo condiciones atmosféricas sólo es justificable en suelos muy duros, con baja permeabilidad o rocas estables. No obstante, se deberían tomar las precauciones necesarias para rápidamente poder prestar una adecuada cobertura de aire comprimido o ejecutar mejoras en el terreno.

La experiencia conseguida hasta ahora demuestra que el método saturado puede funcionar muy bien en la construcción hiperbárica de túneles y que es posible trabajar en aire comprimido hasta 6,5 bar de sobrepresión, aunque no sea muy eficiente.

La cooperación establecida entre las empresas de construcción de túneles, el fabricante de tuneladoras, la empresa Herrenknecht AG, el médico hiperbárico Dr. Faesecke, el Hyperbaric Training Center en Alemania, la empresa de clasificación Germanischer Lloyd, la empresa de diseño y fabricación Composite Beat Engel y Nordseetaucher GmbH es muy productiva y gratificante, y esperamos que se intensificará en futuras cooperaciones. La excelente formación del personal de buceo, ingenieros y técnicos de construcción hiperbárica involucrados en estos proyectos pioneros, así como la formación continuada y la adaptación de las tuneladoras a las condiciones existentes, abren una perspectiva muy prometedora en el futuro de la construcción de túneles: más profundo, más grande y más largo

