



Universitat Autònoma de Barcelona

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  [http://cat.creativecommons.org/?page\\_id=184](http://cat.creativecommons.org/?page_id=184)

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



**Universitat Autònoma  
de Barcelona**

Departament de Pediatria, d'Obstetrícia i Ginecologia i de Medicina Preventiva  
Programa de Doctorat en "Metodologia de la Recerca Biomèdica i Salut Pública"

**EVOLUCIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS FISIOLÓGICOS Y  
VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS, Y DE  
RESPUESTA EN EMERGENCIAS EN CONDICIONES  
HIPERBÁRICAS, IMPLEMENTADAS EN TRABAJADORES DE  
TUNELADORAS DE GRAN DIÁMETRO EPBS (Earth Pressure  
Balance)**

Memoria presentada por Agustí Ruiz Caballero para optar al grado de  
Doctor por la Universidad Autònoma de Barcelona

**Directores de la Tesis:**

Dr. Miguel Martin Mateo

Dr. Vicent Fonollosa Pla

Septiembre de 2019

## AGRADECIMIENTOS / AGRAÏMENTS

El procés d'elaboració d'aquesta tesi ha estat poder una mica més llarg i complex del que m'esperava. Des de les primeres propostes del projecte, la gens ni mica fàcil tasca de presa de dades, els continus problemes administratius, els canvis legislatius, els vaivens i contradiccions propis de qualsevol elaboració d'una tesi, les dificultats específiques de l'entorn i del tema triat, i un llarg etc., han suposat una veritable carrera d'obstacles

Cursa d'obstacles cada vegada més complicada i en la que, mentrestant, la vida continuava i de vegades es complicava, de forma inexorable, tant a nivell personal, familiar, com també laboral i professional.

Davant d'aquest escenari poc afavoridor, no puc més que agrair en primer lloc, de forma destacada, i de tot cor, al meu gran amic i co-director de tesi, Miguel Martin:

*Gracias Miguel por tu implicación, tu esfuerzo, tu interés, tus conocimientos, tus inquietudes, tu ayuda, tu trato, tu comprensión, tu paciencia, tu perseverancia, y un largo, muy largo etc. Sin ti este trabajo quizás no hubiera llegado nunca a su fin. Gracias por confiar en mí y darme esta oportunidad.*

Gràcies al Dr. Vicent Fonollosa, per la seva col·laboració i suport facilitant-me les coses en tot el que ha pogut, tant en la tesi com en altres àmbits professionals. Gràcies Vicent per obrir-me els ulls de una forma tant senzilla, i clara al mateix temps, durant la fase de redacció de la tesi amb els teus consells i la teva actitud sempre engrescadora i optimista.

No puc menys que citar, i agrair, la col·laboració del personal operatiu del IEM, tant de medicina, com d'infermeria, com de TTS / TES, que amb la seva formació, professionalitat i implicació personal han posat a la pràctica un dels principals objectius d'aquesta tesi: la seguretat del personal de intervenció. Gràcies Jaume, Marc, Norma, Jessica, M<sup>a</sup> Angeles, Andrés, Ruth, Rosa, Toni, Nando, etc. I sense oblidar-me del Jorge, de manteniment, sempre tant servicial, atent, implicat i responsable.

Al personal d'administració del IEM per facilitar-me la feina en tot el que heu pogut.

Gràcies a tot el personal cabussador d'InstalSub, població objecte de l'estudi, per la seva col·laboració, i molt especialment al seu director tècnic Xavier Ferran pel seu suport, els seus coneixements, i pel convenciment que ha demostrat sempre de la

importància dels primers actuants en una emergència, i de la importància del treball en equip entre sanitaris i cabussadors.

A Guillem Cuadrado, Cap de Prevenció de la UTE Túnel Sabadell, per creure radicalment en la importància de la prevenció, la formació i la seguretat, i confiar tant en nosaltres, els sanitaris del IEM.

Al l'Andrea i la Paula, per el seu suport administratiu imprescindible de darrera hora, a la recta final de la tesi tot evitant un possible naufragi.

Gràcies Sandra, pel teu suport, la teva amicitat, companyia, paciència, empatia, confiança, tolerància, optimisme, energia, comprensió, humilitat, tendresa, i tantes, tantes coses positives que transmits.

Als meus pares que tant trobo a faltar i que sempre van creure en mi i em van inculcar la cultura de l'esforç, del treball, de la implicació, de la lluita i de la resiliència.

Als meus fills David i Sara, el més important que tinc, i amb els que ha coincidit tot l'estrès que comporta la darrera fase d'aquesta tesi amb una situació familiar força complicada que esperem resoldre entre tots tres el millor i més aviat possible. Gràcies per la vostra estima i la vostra companyia. Doneu sentit a la vida.

Barcelona 10 de setembre de 2019

Dedicat al Miguel Martin

*«Hay hombres que luchan un día y son buenos.*

*Hay otros que luchan un año y son mejores.*

*Hay quienes luchan muchos años, y son muy buenos.*

*Pero los hay que luchan toda la vida: esos son los imprescindibles»*

Bertolt Brecht

## ABREVIACIONES

AAS	Ácido acetilsalicílico
ADB	Accidentes disbáricos del buceo
AMPc	Adenosín monofosfato cíclico
ATP	Adenosín trifosfato
BOE	Boletín Oficial del Estado
°C	Grados centígrados
CO	Monóxido de carbono
CO <sup>2</sup>	Dióxido de carbono
DAN	<i>Divers Alert Network</i>
DE	Desviación Estándar
DLCO	Difusión del monóxido de carbono
EAP	Edema Agudo de Pulmón
EAPI	Edema Agudo de Pulmón por inmersión
EPBs	<i>Earth Pressure Balance</i> (Escudos de balance de presión de tierras)
EtCO <sup>2</sup>	Dióxido de carbono al final de la espiración
EPOC	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
FC	Frecuencia cardíaca
FEDAS	Federación Española de Actividades Subacuáticas
FiO <sup>2</sup>	Fracción inspirada de oxígeno
GC	Gasto cardíaco
Hb	Hemoglobina

ICO	Intoxicación por monóxido de carbono
IMC	Índice de masa corporal
MetaHb	Metahemoglobina
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
PA	Presión arterial
PaCO <sub>2</sub>	Presión arterial de dióxido de carbono
PAO <sub>2</sub>	Presión alveolar de oxígeno
PaO <sub>2</sub>	Presión parcial de oxígeno arterial
PAM	Presión arterial media
PDE	Fosfodiesterasa
PAD	Presión arterial diastólica
PAS	Presión arterial sistólica
PLT	Politraumático
PTG	Paciente traumático grave
RCP	Reanimación Cardiopulmonar
SDRA	Síndrome de distrés respiratorio agudo del adulto
SpCO	Saturación de la carboxihemoglobina
SpO <sub>2</sub>	Saturación arterial de oxígeno medida por pulsioximetría
SpMet	Saturación de la metahemoglobina
SVA	Soporte Vital Avanzado
SVAT	Soporte Vital Avanzado en Trauma

TBG	<i>Tiefbau-Berufsgenossenschaft</i> (Asociación de Seguros Legales de Accidentes)
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i> (Taladradora de túneles o tuneladora)
TCC	Temperatura corporal central
TES	Técnico/a de emergencias sanitarias
TTS	Técnico/a de transporte sanitario
UTE	Unión temporal de empresas
V/Q	Cociente ventilación/perfusión
Vt	Volumen <i>Tidal</i> o Volumen corriente

<b>SUMARI / SUMARIO / ABSTRACT</b>	11
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	20
<b>1.1 Presentación</b>	20
1.1.1 El nuevo metro urbano de Sabadell	21
1.1.2 Cuatro nuevas estaciones	22
1.1.3 Subcontrataciones de alta especialización	24
1.1.3.1 InstalSUB. Empresa de servicios hiperbáricos	
1.1.3.2 IEM (Instituto de Estudios Médicos). Servicio preventivo de urgencias y emergencias	
<b>1.2 Interés del proyecto</b>	35
<b>1.3 Descripción del entorno de trabajo</b>	36
1.3.1 Marco legal vigente en el momento del estudio	36
1.3.2 Tuneladoras. Conceptos básicos	38
1.3.3 Las tuneladoras EPBs (Earth Pressure Balance)	41
1.3.3.1 Componentes básicos de una tuneladora EPB	
1.3.3.2 Parámetros de avance de la tuneladora	
1.3.4 Mantenimiento, inspección y reparación de las tuneladoras	50
1.3.4.1 Revisión de herramientas en ambiente hiperbárico	
1.3.5 Antecedentes históricos previos en la utilización de las tuneladoras EPBs a la tuneladora objeto de este estudio	56
1.3.6 Factores de riesgo globales del entorno de las tuneladoras	63
1.3.6.1 Riesgos geológicos	
1.3.6.2 Riesgos atmosféricos	
1.3.6.3 Riesgos relacionados con las dovelas del revestimiento	
1.3.6.4 Riesgos mecánicos	
1.3.6.5 Riesgos a terceros	
1.3.7 Riesgos genéricos del trabajo en tuneladoras y acciones correctoras aplicadas de forma estandarizada según la normativa vigente	67
1.3.7.1 Caídas a distinto nivel	
1.3.7.2 Caídas al mismo nivel	
1.3.7.3 Caídas de objetos por desplome o derrumbamiento	
1.3.7.4 Caídas de objetos en manipulación (materiales, herramientas)	

- 1.3.7.5 Caídas de objetos desprendidos (materiales no manipulados)
- 1.3.7.6 Pisadas sobre objetos
- 1.3.7.7 Golpes contra objetos inmóviles
- 1.3.7.8 Golpes con elementos móviles de máquinas
- 1.3.7.9 Golpes con objetos o herramientas
- 1.3.7.10 Proyección de fragmentos o partículas
- 1.3.7.11 Atrapamiento por o entre objetos
- 1.3.7.12 Atrapamiento por vuelco de máquinas o vehículos
- 1.3.7.13 Sobreesfuerzos
- 1.3.7.14 Exposición a temperaturas ambientales extremas
- 1.3.7.15 Contactos térmicos
- 1.3.7.16 Contactos eléctricos
- 1.3.7.17 Inhalación o ingestión de sustancias nocivas
- 1.3.7.18 Contacto con sustancias causticas y/o corrosivas
- 1.3.7.19 Exposición a radiaciones
- 1.3.7.20 Explosiones
- 1.3.7.21 Incendios
- 1.3.7.22 Accidentes causados por seres vivos (ratas, etc.)
- 1.3.7.23 Atropellos, golpes y choques con vehículos
- 1.3.7.24 Accidentes de tránsito (*in itinere*)
- 1.3.7.25 Causas naturales (en horario laboral)
- 1.3.7.26 Enfermedades causadas por agentes químicos
- 1.3.7.27 Enfermedades causadas por agentes físicos
- 1.3.7.28 Enfermedades causadas por agentes biológicos
- 1.3.7.29 Accidentes causados por el entorno hiperbárico objeto del presente estudio
- 1.3.7.30 Resumen esquemático de los riesgos más destacados objeto del presente estudio
- 1.3.8 Dificultades y riesgos específicos, o incrementados, en tuneladoras EPBs o hiperbáricas

1.4	<b>Descripción de los trabajadores de tuneladoras</b>	89
1.4.1	Sin presión	89
1.4.2	A presión	90
1.5	<b>Perfil de salud previo de los buceadores objeto de estudio</b>	90
1.5.1	Protocolo de valoración médica de aptitud para trabajadores en ambiente hiperbárico (revisiones médicas de buceo)	92
1.6	<b>Antecedentes y experiencias en tuneladoras EPBs en la Península Ibérica</b>	97
2.	<b>ENTORNO FISIOPATOLÓGICO HIPERBARICO</b>	99
2.1	<b>Fundamentos básicos del buceo</b>	99
2.1.1	Fundamentos físicos	100
2.1.1.1	El principio de Arquímedes	
2.1.1.2	Presión	
2.1.1.3	Leyes de los gases	
2.1.2	Fundamentos fisiológicos y riesgos propios en el buceo	103
2.1.2.1	Efectos de la presión	
2.1.2.2	Efectos bioquímicos	
2.2	<b>Síndromes relacionados con la práctica del buceo y de actividades en entornos hiperbáricos en general</b>	108
2.2.1	Accidentes no disbáricos	109
2.2.1.1	Asfixia mecánica. Generalidades	
2.2.1.2	Ahogamiento por sumersión	
2.2.1.3	Traumatismos. Atención inicial prehospitalaria del paciente traumático grave.	
2.2.1.4	Termopatias	
2.2.2	Accidentes disbáricos (ADB)	131
2.2.2.1	Enfermedad descompresiva (ED)	
2.2.2.2	Síndrome de Hiperpresión Intratorácica (SHI)	
2.2.2.3	Edema Agudo de Pulmón por inmersión (EAPI)	
2.2.2.4	Clínica de los ADB por orden de prevalencia	
2.2.2.5	Guía básica de actuación prehospitalaria en ADB	
2.2.2.6		
3.	<b>PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN</b>	141
4.	<b>HIPÓTESIS</b>	142

<b>5. OBJETIVOS</b>	143
5.1 <b>Objetivo general</b>	143
5.2 <b>Objetivos específicos</b>	143
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	144
6.1 <b>Población y lugar objetos de estudio</b>	144
6.2 <b>Medidas preventivas y de control implementadas</b>	144
6.2.1 Procedimientos específicos de intervención en emergencias	
6.2.2 Simulacros	146
6.3 <b>Determinación de las variables de estudio</b>	147
6.3.1 Parámetros fisiopatológicos estudiados	147
6.3.2 Método de control de los parámetros definidos	148
6.3.3 Material electromédico utilizado en el control de los parámetros definidos	148
6.3.3.1 Monitor automático de la presión arterial Omron R7	
6.3.3.2 Termómetro de frente y oído MOD 2738	
6.3.3.3 Pulsí Co-oxímetro MASIMO RAD-57tm	
6.4 <b>Análisis estadístico</b>	157
<b>7. RESULTADOS</b>	158
7.1 <b>Descripción de la muestra</b>	158
7.2 <b>Condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo) según el número de paradas de descompresión realizadas del grupo hiperbárico</b>	159
7.3 <b>Comparación de las condiciones fisiológicas de los trabajadores antes y después de la intervención hiperbárica</b>	160
7.4 <b>Descripción de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiológicas del grupo de estudio y el grupo control</b>	
7.5 <b>Generar una guía de prevención y seguridad para los trabajos en tuneladoras EPBs</b>	163
<b>8. DISCUSIÓN</b>	164
8.1 <b>Sobre la muestra</b>	164
8.2 <b>Condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo) según el número de paradas de descompresión realizadas del grupo hiperbárico</b>	165
8.3 <b>Comparación de las condiciones fisiológicas de los trabajadores antes y después de la intervención hiperbárica</b>	166
8.4 <b>Descripción de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiológicas del grupo de estudio y el grupo control</b>	

<b>9. LIMITACIONES DEL ESTUDIO</b>	168
<b>10. CONCLUSIONES</b>	169
10.1 Conclusiones según los objetivos generales	169
10.2 Conclusiones según los objetivos específicos	169
<b>11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b>	170
<b>12. GLOSARIO</b>	171
<b>13. BIBLIOGRAFIA</b>	176
<b>14. ANEXOS</b>	182

# SUMARI

## Introducció

La creixent utilització de tuneladores de gran diàmetre EPBs (*Earth Pressure Balance*), ha comportat l'aparició de nous riscos i dificultats per als serveis d'emergències, que haurien de conèixer amb detall i disposar de procediments d'intervenció específics.

Les tuneladores EPBs es caracteritzen per treballar mantenint el front d'excavació pressuritzat per a evitar desprendiments al cap de tall. Aquestes condicions hiperbàriques en la zona de treball comporten una dificultat afegida a les ja existents en els treballs de manteniment i recanvi de les eines de tall: temperatura i humitat ambiental elevades, treballs d'alçada (10 -12 m. aprox.), manipulació d'eines pesades que precisen d'instal·lacions de suport, perill de desprendiments, etc.

Es requereix de personal acreditat, qualificat i format adequadament per a cicles controlats de compressió, treball i descompressió. Segons la normativa actual a Espanya es precisa de l'acreditació de cabussador professional per a poder treballar en condicions hiperbàriques.

Les empreses constructores han d'articular importants mesures de seguretat i comptar, entre altres, amb la presència d'un Servei Preventiu d'Assistència Sanitària Immediata capaç de poder resoldre amb eficàcia i eficiència un accident en aquest àmbit tant complex fins a l'arribada dels serveis d'emergències. El personal sanitari i de rescat ha de disposar d'un perfil clarament prehospitalari amb experiència i formació específiques en medicina hiperbàrica i d'emergències degudament acreditades.

## Objectius

Avaluar les mesures preventives proposades i implementades pel IEM amb el suport d'empreses del busseig professional i dels serveis preventius de la UTE Túnel Sabadell.

### Objectius específics

Descriure les condicions fisiològiques dels treballadors prèvies i posteriors a la intervenció hiperbàrica.

Valorar l'evolució dels seus paràmetres fisiològics.

Generar una guia de prevenció i seguretat per als treballs en tuneladores EPBs

## **Materials i mètodes**

La població objecte de l'estudi van ser 60 cabussadors professionals que treballaven en condicions hiperbàriques. La població de control, 30 mecànics de la tuneladora, que treballaven en condicions normobàriques.

Com a lloc i temps de l'estudi es va determinar que fora durant les obres de construcció del túnel del metro de Sabadell.

Com a mesures preventives i de control es van implementar les que van ser elaborades "ad hoc" i van ser especificades en el Pla d'Emergències de la UTE Túnel Sabadell.

Les variables d'estudi que es van determinar, i que van ser preses a peu de tuneladora, van ser: Pressió arterial (PA), Freqüència cardíaca (FC), Freqüència respiratòria (FR), Temperatura (Temp °C), Saturació d'oxigen (SpO2), Carboxihemoglobina (SpCO) i la Metahemoglobina (SpMet).

## **Resultats**

El grup control té una mitjana d'edat de 38,5 anys amb una desviació estàndard (DE) de 7,3 anys, amb un mínim de 26 i un màxim de 54. El grup de treball hiperbàric té una mitjana d'edat de 32,3 anys i una DE de 6,7 anys, amb un mínim de 21 i un màxim de 51.

La diferència de la mitjana d'edat 6,2 anys entre els treballadors és significativa amb  $p < 0,001$ .

El grup control ha efectuat 98 entrades, amb una mitjana de 3,2 i una DE de 2,8. El grup hiperbàric té 366 entrades amb una mitjana de 6,1 i una DE de 4,6.

La diferència de mitjana d'entrades per treballador és significativa amb  $p < 0,05$ .

El temps en el fons (TF) del personal a pressió és d'una mitjana de 147 minuts i una DE 35,3. En els treballadors normobàrics el TF és de 189 minuts i una DE de 93.

El temps de descompressió té una mitjana de 18 minuts amb una DE de 6,4 minuts havent realitzat un nombre de parades de mitjana 185 i de 0,6 minuts

Els treballadors hiperbàrics han treballat a una pressió relativa mitjana de 1,1 bars amb una DE de 0,25 bars.

## **Conclusions**

Tots els treballadors hiperbàrics van presentar unes condicions fisiològiques adequades prèvies a la intervenció. A la seva sortida van presentar tots els bussejadors un perfil fisiològic de normalitat.

No es van trobar diferències, ni estadístiques ni fisiològiques, significatives entre grup estudi i control en cap dels paràmetres valorats.

La falta d'accidents i/o incidents mínimament destacables permeten concloure que el conjunt de mesures preventives proposades i implementades pel IEM, amb el suport d'empreses del busseig professional i dels serveis preventius de la UTE Túnel Sabadell, van ser encertades.

La resposta en urgències i emergències, i evidentment en les tuneladores EPBs, requereix de personal altament qualificat i preparat per a treballar de forma integral i coordinada amb la resta dels cossos operatius. La prevenció, la seguretat i una resposta eficient en emergències és responsabilitat de tothom.

## **Paraules clau**

Tuneladores EPBs (*Earth Pressure Balance*)

Hiperbàric

Bussejadors

Servei Preventiu d'Emergències

Pla d'Emergències

## **SUMARIO**

### **Introducción.**

La creciente utilización de tuneladoras de gran diámetro EPBs (Earth Pressure Balance), ha comportado la aparición de nuevos riesgos y dificultades para los servicios de emergencias, que deberían conocerlos con detalle y disponer de procedimientos de intervención específicos.

Las tuneladoras EPBs se caracterizan por trabajar manteniendo el frente de excavación presurizado para evitar desprendimientos en la cabeza de corte. Estas condiciones hiperbáricas en la zona de trabajo comportan una dificultad añadida a las ya existentes en los trabajos de mantenimiento y recambio de las herramientas de corte: temperatura y humedad ambiente elevadas, trabajos de altura (10 -12 m. aprox.), manipulación de herramientas pesadas que precisan de instalaciones de soporte, peligro de desprendimientos, etc.

Se requiere de personal acreditado, cualificado y formado adecuadamente para ciclos controlados de compresión, trabajo y descompresión. Según la normativa actual en España se precisa de la acreditación de buzo profesional para poder trabajar en condiciones hiperbáricas.

Las empresas constructoras deben articular importantes medidas de seguridad y contar, entre otras, con la presencia de un Servicio Preventivo de Asistencia Sanitaria Inmediata capaz de poder resolver con eficacia y eficiencia un accidente en este complejo ámbito hasta la llegada de los servicios de emergencias. El personal sanitario y de rescate debe disponer de un perfil claramente prehospitalario con experiencia y formación específicas en medicina hiperbárica y de emergencias debidamente acreditadas.

### **Objetivos**

Evaluar las medidas preventivas propuestas e implementadas por el IEM con el soporte de empresas del buceo profesional y de los servicios preventivos de la UTE Túnel Sabadell.

#### **Objetivos específicos**

Describir las condiciones fisiológicas de los trabajadores previas y posteriores a la intervención hiperbárica

Valorar la evolución de sus parámetros fisiológicos.

Generar una guía de prevención y seguridad para los trabajos en tuneladoras EPBs

## **Materiales y métodos**

La población objeto del estudio fueron 60 buzos profesionales que trabajaban en condiciones hiperbáricas La población de control, 30 mecánicos de la tuneladora, que trabajaban en condiciones normobáricas.

Como lugar y tiempo del estudio se determinó que fuera durante las obras de construcción del túnel del metro de Sabadell.

Como medidas preventivas y de control se implementaron las que fueron elaboradas “*ad-hoc*” y fueron especificadas en el Plan de Emergencias de la UTE Túnel Sabadell.

Las variables de estudio que se determinaron, y que fueron tomadas a pie de tuneladora, fueron: Presión arterial (PA), Frecuencia cardíaca (FC), Frecuencia respiratoria (FR), Temperatura (Temp °C), Saturación de oxígeno (SpO2), Carboxihemoglobina (SpCO) y la Metahemoglobina (SpMet).

## **Resultados**

El grupo control tiene una media de edad de 38,5 años con una desviación estándar (DE) de 7,3 años, con un mínimo de 26 y un máximo de 54. El grupo de trabajo hiperbárico tiene una media de edad de 32,3 años y una DE de 6,7 años, con un mínimo de 21 y un máximo de 51.

La diferencia de la media de edad 6,2 años entre los trabajadores es significativa con  $p < 0,001$ .

El grupo control ha efectuado 98 entradas, con una media de 3,2 y una DE de 2,8. El grupo hiperbárico tiene 366 entradas con una media de 6,1 y una DE de 4,6.

La diferencia de media de entradas por trabajador es significativa con  $p < 0,05$ .

El tiempo en el fondo (TF) del personal a presión es de una media de 147 minutos y una DE 35,3. En los trabajadores normobáricos el TF es de 189 minutos y una DE de 93.

El tiempo de descompresión tiene una media de 18 minutos con una DE de 6,4 minutos habiendo realizado un número de paradas de media 185 y de 0,6 minutos

Los trabajadores hiperbáricos han trabajado a una presión relativa media de 1,1 bars con una DE de 0,25 bars.

## **Conclusiones**

Todos los trabajadores hiperbáricos presentaron unas condiciones fisiológicas adecuadas previas a la intervención. A su salida presentaron todos los buceadores un perfil fisiológico de normalidad.

No se encontraron diferencias, ni estadísticas ni fisiológicas, significativas entre grupo estudio y control en ninguno de los parámetros valorados.

La falta de accidentes y/o incidentes mínimamente destacables permiten concluir que el conjunto de medidas preventivas propuestas e implementadas por el IEM, con el soporte de empresas del buceo profesional y de los servicios preventivos de la UTE Túnel Sabadell, fueron acertadas.

La respuesta en urgencias y emergencias, y evidentemente en las tuneladoras EPBs, requiere de personal altamente cualificado y preparado para trabajar de forma integral y coordinada con el resto de los cuerpos operativos. La prevención, la seguridad y una respuesta eficiente en emergencias es responsabilidad de todos.

## **Palabras clave**

Tuneladoras EPBs (Earth Pressure Balance)

Hiperbárico

Buceadores

Servicio Preventivo de Emergencias

Plan de Emergencias

# **ABSTRACT**

## **Introduction**

Growing use of EPBs (Earth pressure balance) high diameter tunneling machines has incurred the appearance of new risks and difficulties for the emergency services, that should know in detail and have specific intervention proceedings.

EPBs tunneling machines are characterized for the maintenance of the pressurized excavation front to avoid rockfall. These hyperbaric conditions in the working area entail an additional difficulty to the already existing in the maintenance work and replacement of the cutting tools: elevated temperature and environmental humidity, height jobs (10 – 12 m approximately), heavy tool manipulation that require support installations, rock fall danger, etc.

Accredited, qualified and formed personnel is required for controlled cycles of compression, work and decompression. According to the actual regulation in Spain, the professional diver accreditation is required to be able to work in hyperbaric conditions.

Constructor enterprises have to articulate important security measures and count, among others, with the presence of a Preventive Service of Immediate Sanitary Assistance able to efficiently and effectively solve an accident in this complex environment until the emergency services arrival. The sanitary and rescue personnel must have a clear prehospitalary profile with experience and formation in hyperbaric medicine and emergencies correctly accredited.

## **Objectives**

To evaluate the preventive measures proposed and implemented by the IEM with the support of professional diving enterprises and the preventive services of the UTE Túnel Sabadell.

### **Specific objectives**

To describe the physiological conditions of workers previous and posterior to the hyperbaric intervention.

To evaluate the evolution of their physiological parameters.

To generate a guide of prevention and security to the workers in EPBs tunneling machines.

## **Materials and methods**

Study population was formed by 60 professional divers who worked in hyperbaric conditions. Control population was formed by 30 mechanics of the tunneling machine who worked in normobaric conditions.

Place and time of the study were determined to be during the construction process of the Sabadell underground.

Preventive and control measures were elaborated and implemented “ad hoc” and specified in the Emergency Plan of the UTE Túnel Sabadell.

Studied variables were determined and measured near the tunneling machine were: arterial pressure, cardiac frequency, respiratory frequency, temperature, oxygen saturation, carboxyhemoglobin and metahemoglobin.

## **Results**

Control group has a mean age of 38.5 years with a standard deviation (SD) of 7.3 years, a minimum of 26 and a maximum of 54. Hyperbaric work group has a mean age of 32.3 years, with a SD of 6.7 years, a minimum of 21 and a maximum of 51.

The different mean age of 6.2 years between workers is significant with  $p < 0.001$ .

Control group has performed 98 entries, with a mean of 3.2 and a SD of 2.8. Hyperbaric group has 366 entries, with a mean of 6.1 and a SD of 4.6. Difference between entry means per worker is significant with  $p < 0.05$ .

Time in the tunnel (TT) of pressure working personnel is a mean of 147 minutes with a SD of 35.3. In normobaric workers the TT is of 189 minutes with a SD of 93.

Decompression time has a mean of 18 minutes with a SD of 6.4 minutes having performed a mean stop number of 185 and of 0.6 minutes.

Hyperbaric workers have worked at a relative mean pressure of 1.1 bars with a SD of 0.25 bars.

## **Conclusions**

All hyperbaric workers showed adequate physiological conditions prior to the intervention.

After leaving the tunnel, all divers had a normal physiological profile.

No differences, nor statistical or physiological, significant differences were found between the study group and the control group in any of the parameters assessed.

The lack of remarkable accidents and / or incidents allowed us to conclude that the set of the preventive measures proposed and implemented by the IEM and supported by companies of the professional diving and the preventive services of the UTE Tunnel Sabadell, were adequate.

The response in emergencies and obviously in the EPB tunneling machines, requires highly qualified personnel to work in a comprehensive and coordinated way with the other operating groups.

Prevention, security and an efficient response in emergencies is the responsibility of everyone.

## **Keywords**

EPBs (*Earth Pressure Balance*) tunneling machines

Hyperbaric

Divers

Preventive Emergencies Service

Emergencies Plan

# 1. INTRODUCCIÓN

La introducción es posiblemente más extensa de lo habitual en este tipo de estudios debido al gran desconocimiento general de este ámbito de trabajo.

Sin una explicación previa puede ser difícil analizar con claridad los condicionantes de este estudio, entre otros:

- Entorno de trabajo complejo.
- Necesidad de perfiles muy específicos de profesionales implicados, sanitarios y no sanitarios.
- Desconocimiento evidente de la fisiopatología en medicina hiperbárica.
- Dificultades extremas en el trabajo de campo para la obtención de datos.
- Falta de procedimientos previos.
- Ausencia de publicaciones específicas de referencia.

## 1.1 Presentación

La Generalitat de Catalunya adjudicó el 20 de diciembre de 2007, por medio de la empresa pública GISA, las obras de ampliación de la línea S2 del Vallès, de los Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC) en Sabadell, por un total de 218 millones de euros, así como la asistencia técnica para la inspección previa de los edificios situado en los alrededores de esta actuación, valorada en 2,6 millones de euros.

La adjudicataria fue la UTE Túnel Sabadell, constituida por las empresas ACCIONA Infraestructuras, COMSA y ACSA. Las obras incluían la construcción de una nueva sección de 4,4 km de longitud, 4 nuevas estaciones y el entierro de Sabadell-Estació.



Logotipo de la UTE Túnel Sabadell

El objetivo era dotar a la ciudad de Sabadell de una línea de metro urbano que serviría a 7 millones usuarios cada año.

Las obras se iniciaron en el 2008 y tuvieron con una duración aproximada de 5 años.

### 1.1.1 El nuevo metro urbano de Sabadell

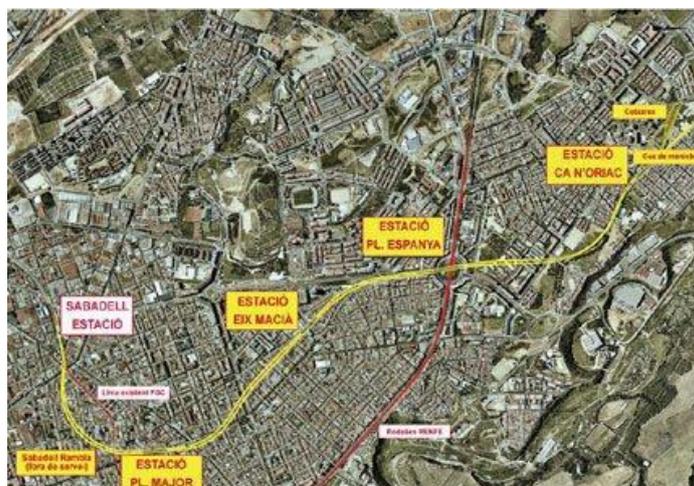


Ilustración 1: Trayecto previsto de las obras del metro urbano de Sabadell

Las obras permitieron la creación de una nueva sección de línea con cuatro nuevas estaciones en el interior de la ciudad de Sabadell y el entierro de la estación Sabadell-Estació. Con la nueva ruta, la estación Sabadell-Rambla, donde terminaba la línea, fue reemplazada por una nueva estación en la Plaça Major que daría servicio a los usuarios de la zona. Desde aquí, la ruta continúa hacia el noreste hasta las nuevas estaciones de l'Eix Macià y la Plaça de España, donde se realizaría el intercambio con RENFE. Más al norte, la nueva estación se ubicará en Ca n'Oriac y luego, como el final de la línea, las cocheras de autocares y otras instalaciones enterradas.

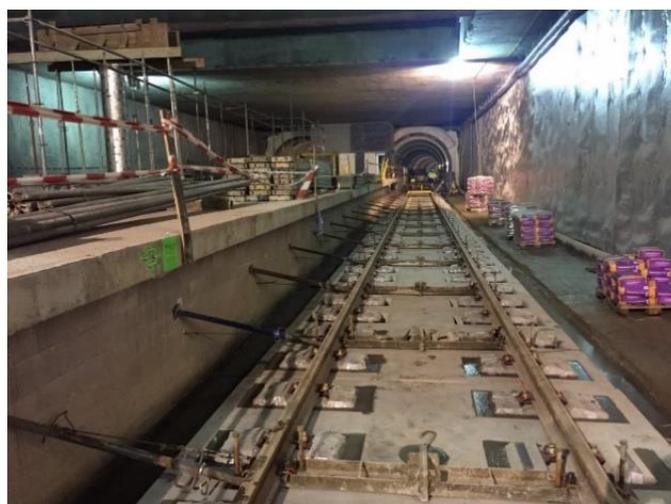


Ilustración 2: Estación en construcción en la ampliación de la línea S2 del Vallés. Fotografía IEM

Las obras incluían la construcción de dos túneles paralelos de 4,9 kilómetros de largo con tuneladoras EPBs de 6,8 metros de diámetro, con el fin de minimizar los efectos en la superficie y garantizar la seguridad de la obra. Las tuneladoras se introdujeron por

una zona cercana al campo de fútbol de Ca n'Oriac y avanzaron hasta el foso de salida ubicado en el actual aparcamiento de superficie Sabadell-Estació.

La mayor parte del resto de las secciones de túneles y pozos, así como todas las estaciones se ejecutaron mediante la aplicación de un sistema de construcción que minimiza el impacto en la superficie. Finalizaron las perforaciones el 6 de noviembre del 2013.

Según las previsiones de crecimiento futuro en la región y las necesidades de movilidad exterior, este proyecto era compatible con una futura ampliación a Castellar del Vallès, así como con el entierro de la línea hacia Sant Quirze del Vallès.

### 1.1.2 Cuatro nuevas estaciones

La ampliación de la línea de FGC en Sabadell también contemplaba la construcción de cuatro nuevas estaciones adaptadas a personas con movilidad reducida, que tendrían escaleras mecánicas, fijas y ascensores:

- **Plaza mayor**

La nueva estación se ubicaría en el espacio ocupado hasta aquel momento por el mercado temporal en el centro de la ciudad de Sabadell, en una zona de gran actividad comercial y de ocio. Tendría dos escaleras mecánicas, una estática y dos ascensores, con el fin de acceder desde la superficie a un vestíbulo subterráneo de 650 m<sup>2</sup> a 14 metros de profundidad.

- **Eix Macià**

Se ubicaría en el cruce de la calle de Pi i Margall con las calles de Borrás y del Papa Pío XI y le permitiría prestar servicio a l'Eix Macià, que es el principal centro de negocios y entretenimiento de la ciudad. Dispondría de dos entradas independientes, con escalas fijas y mecánicas, y otro ascensor, para conectar el exterior con el vestíbulo, que tendría 522 m<sup>2</sup>. Este espacio se ubicaría a 9 metros de profundidad y se conectaría con la plataforma central de 120 metros de largo y 9 metros de ancho.

- **Plaza de España**

Esta estación de formaría parte de la futura estación intermodal, que permitiría el intercambio entre FGC y RENFE línea C4. La estación intermodal se dividiría en diferentes niveles: un lobby compartido y enterrado en el primer nivel se conectaría con las plataformas de RENFE situadas a un nivel inferior y con la plataforma central de FGC, situada en un nivel más profundo, bajo el túnel de RENFE.

El acceso desde el exterior al lobby común sería por medio de un elevador y escaleras fijas y mecánicas. Del mismo modo, la vinculación entre el vestíbulo y la plataforma de FGC se realizaría a un extremo de la plataforma central de 120 metros de largo y 9 metros de ancho, con ascensor y escalera fija y mecánica.

- **Ca n'Oriac**

Se localizaría debajo de la calle Himalaya, próxima al Parc del Nord. Tendría ascensores y escaleras mecánicas y fijas para conectar el exterior con el vestíbulo y la andana central de 120 metros de largo y 9 metros de ancho.

También, se revisarían previamente los edificios, locales comerciales y sótanos dentro de la zona de influencia de la obra, que incluye unas 7.660 viviendas y locales y 1.471 edificios. El objetivo de las inspecciones previas era documentar el estado previo de conservación de los edificios para su uso como referencia antes, durante y después de las obras, y garantizar a los propietarios de los edificios un documento fiel del estado de los edificios en previsión de cualquier afectación durante la obra.

El trazado del túnel discurre el 100% en el subsuelo urbano de Sabadell con un total de 4,9 km de longitud, de los cuales 0,7 km son en túnel entre pantallas y el resto se ha ejecutado un túnel bi-tubo de 6,5 m de diámetro interior, para el cual se ha empleado una tuneladora de tipo EPBs de 6,8 m de diámetro, 116 metros de longitud y 550 toneladas, con una rueda de corte preparada para excavar suelos bajo el nivel freático.

La geología del subsuelo de Sabadell por el cual ha transcurrido la excavación del túnel puede clasificarse principalmente por 2 tipos de terreno bien diferenciados: un terreno de tipo cuaternario y otro de tipo mioceno, los cuales se han ido alternando a lo largo del recorrido.

El terreno identificado como cuaternario es un material granular con alto grado de compactación y en ocasiones cementado, el cual contiene principalmente arena fina, con fracciones menores de limo y arcilla, y algunas piedras de dimensiones mayores, mientras que el mioceno, con mayor porcentaje de arena y menos grava que el cuaternario, constituye una fracción formada principalmente por limos arenosos y arcilla.

Para el acondicionamiento del terreno, se ha empleado principalmente Polyfoamer FP/CC, aditivo espumógeno, rápida y completamente biodegradable, basado en tensoactivos aniónicos, combinado con polímero. Con este aditivo se lograron excelentes rendimientos de excavación, gracias a sus prestaciones para acondicionar

el terreno y particularmente a su capacidad para lubricar reduciendo el par de rotación de rueda de corte y disminución del desgaste de los elementos de corte.

### **1.1.3 Subcontrataciones de alta especialización en intervenciones hiperbáricas: InstalSUB e IEM**

La adjudicataria UTE Túnel Sabadell, que como se comentó anteriormente estaba formada por las empresas ACCIONA Infraestructuras, COMSA y ACSA, fue la responsable de las obras.

Las tuneladoras EPBs, cuando trabajan a presión, requieren de personal acreditado, cualificado y formado adecuadamente para trabajos hiperbáricos en ciclos controlados de compresión, trabajo y descompresión.

Según la Orden del Ministerio de Fomento de 14 Octubre 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas (BOE Núm. 280, de 22 de Noviembre del 1.997), se requiere la acreditación de buzo profesional para poder trabajar en condiciones hiperbáricas.

Hoy por hoy, en el momento de realizar el presente estudio, es el único referente legal de seguridad en España para trabajos en condiciones de presiones superiores a la atmosférica, a pesar de ser esta orden ministerial una legislación diseñada para actividades de buceo, tanto deportivo como profesional,

Los buzos profesionales, según la legislación en España, deben seguir una formación y un entrenamiento específico, pues su actividad implica alto riesgo. Entre otras algunas de las actividades realizadas por buzos profesionales son:

- Inspecciones de estructuras subacuáticas
- Actividades arqueológicas (preventivas, investigación) en Patrimonio Cultural sumergido
- Inspecciones de barcos
- Obras hidráulicas
- Recogida de algas.
- Filmación e informes NDT.
- Estudios y recogidas de muestras.
- Ingeniería civil
- Reparaciones en presas y pantanos.
- Salvamento de buques y embarcaciones.

- Mantenimiento de piscifactorías.
- Soldadura y corte subacuático.
- Revisiones en plantas nucleares.
- Trabajos en aguas contaminadas.
- Voladuras subacuáticas.
- Rescate submarino, generalmente militares: (Desde sumergibles, cenotes, cavernas submarinas, pozos profundos, ríos o lagos)

En España, para cualquier trabajo remunerado realizado bajo el agua (incluso el científico) o en ambiente hiperbárico como en este caso, tuneladoras EPBs, se debe obtener una titulación oficial de buceo profesional. Éstas, como actualmente todas las formaciones profesionales, se pueden obtener por 2 vías diferenciadas:

### **1. Reglada o académica**

Es decir, competencia del ministerio de enseñanza junto con los departamentos correspondientes de las comunidades autónomas y su denominación actual es: *Ciclo Formativo de Grado Medio de Técnico en Operaciones Subacuáticas e Hiperbáricas*.

Esta titulación incorpora las siguientes especialidades:

- Corte y soldadura.
- Explosivos submarinos.
- Obras hidráulicas.
- Reparaciones a flote y salvamento de buques.
- Especialista en instalaciones y sistemas (camaristas)

### **2. No regladas o no académicas: certificados de profesionalidad y otros**

La competencia la tiene el ministerio de trabajo junto con los departamentos correspondientes de las comunidades autónomas y/o los departamentos con las competencias transferidas en actividades hiperbáricas. Hoy por hoy la inmensa mayoría de buzos profesionales han obtenido el título por esta vía.

En este caso tenemos diferentes titulaciones:

- Certificado de Iniciación al Buceo

La duración del Curso teórico-práctico no es inferior a ciento veinte horas (cuarenta teóricas y ochenta prácticas).

- Título de Buceador Profesional de Segunda Clase Restringido o Pequeña Profundidad.

La duración del curso no es inferior a doscientas cuarenta y cinco horas (ciento cinco teóricas y ciento cuarenta prácticas).

Realización de trabajos subacuáticos básicos con métodos y procedimientos establecidos, utilizando equipos de buceo autónomos y de suministro desde superficie con aire. Efectuar inmersiones hasta una profundidad de 30 metros.

- Título de Buceador Profesional de Segunda clase o Media Profundidad.

La duración del curso no es inferior a trescientas cincuenta horas.

Realizar inmersiones aplicando los protocolos de descompresión y normas de seguridad, manejando equipos e instalaciones hiperbáricas simples para efectuar trabajos subacuáticos básicos con aire/nitrox hasta 50 m.c.a con buceo autónomo o 60 m.c.a con suministro desde superficie.

- Título de Buceador Profesional Primera Clase o Gran Profundidad.

La duración del curso no es inferior a seiscientos setenta y cinco horas. En este nivel, existen 2 titulaciones diferenciadas:

- *Buceador Profesional de Gran Profundidad de Intervención.*

Profundidad operativa de hasta 90 metros, dependiendo de la técnica. Permite buceo autónomo, suministro desde superficie y campana húmeda.

- *Buceador Profesional de Gran Profundidad a Saturación.*

Profundidad operativa limitada únicamente por la técnica de buceo empleada. Permite buceo autónomo, suministro desde superficie, campana húmeda, y torreta de inmersión. Habilita para el buceo en saturación (letra Z en las tablas U.S. Navy).

A destacar que en todas las formaciones y titulaciones mencionadas se incluyen apartados concretos de Fisiopatología del Buceo y de Primeros Auxilios más o menos extensos dependiendo del nivel. En algún caso superan las 150 horas presenciales. Con esta formación podemos afirmar que el buceador tiene interiorizados los riesgos inherentes a su actividad.

Los motivos que pueden comportar una intervención hiperbárica en el frente de excavación de estas tuneladoras son:

- Trabajos de inspección.
- Trabajos de mantenimiento programados.
- Trabajos de reparación de urgencia.



*Ilustración 3: Buceadores de InstalSub en la zona de trabajos hiperbáricos. Foto IEM*

#### 1.1.3.1 **INSTALSUB. Empresa de servicios hiperbáricos**

Para estas intervenciones se precisaba de empresas especializadas en este tipo de actuaciones. Fue seleccionada **Instalaciones Submarinas SA (InstalSub)**. Sus profesionales debían ejercer su trabajo de mantenimiento en el periodo llamado parada hiperbárica.

**instalSub**

InstalSub era, y es, una empresa de buceo profesional que realiza todo tipo de trabajos en medios hiperbáricos, acuáticos o no, y entre otros, tuneladoras y entornos confinados similares.

Antes del inicio de las obras constaban ya, en el historial de InstalSub, 19.876 horas de trabajo en tuneladoras EPBs. A destacar las tuneladoras utilizadas para la construcción





*Ilustración 5: Corona de la tuneladora EPB (Earth Pressure Balance). Fotografía UTE Tuneladora metro*

#### **1.1.3.2 IEM (Instituto de Estudios Médicos). Servicio preventivo de urgencias y emergencias**

La administración, y las empresas constructoras, entre otras medidas preventivas, objetivaron desde el inicio la necesidad de poder contar con la presencia de un Servicio Preventivo de Asistencia Sanitaria de Emergencias capaz de poder resolver con eficacia y eficiencia un accidente en este complejo ámbito con un perfil de riesgos muy amplio, diverso y en algún caso muy específico.

Las condiciones de trabajo en este ámbito se dan en un entorno de riesgo en condiciones extremas, a destacar, entre otros:

- Los derivados del propio entorno hiperbárico.
- Los que se derivan de las consecuencias de la realización de esfuerzos físicos importantes en un entorno hiperbárico, con todos los peligros intrínsecos que comporta, incrementando el riesgo de posibles accidentes disbáricos entre el personal.
- Temperatura y humedad ambiente elevadas.
- Contaminación sonora importante.

- Trabajos en altura (10 -12 m. aprox. dependiendo del modelo de tuneladora).
- Manipulación de herramientas pesadas que precisan de instalaciones de soporte.
- Peligro de desprendimientos por inestabilidad del terreno.
- Terreno pantanoso con peligro de hundimiento e inundación.
- Accesos complicados: antecámara y cámara hiperbárica previas a la zona de trabajo.
- Dificultad extrema para la intervención para los equipos de socorro externos (dilatado tiempo de llegada y condiciones adversas específicas).
- Otros.

Haciendo un breve resumen de la patología que se puede presentar, sola o simultáneamente, y que debían de prever los servicios sanitarios, nos podíamos encontrar con:

- Traumatismos en general
- Hemorragias
- Politraumatismos
- Accidentes disbáricos
- Quemaduras
- Hipertermia
- Hipotermia
- Ahogamiento
- Intoxicaciones
- Otras patologías médicas

Patologías asociadas al entorno de las tuneladoras EPBs

Para poder hacer frente a estos accidentes en este ámbito el personal sanitario y de rescate debía de tener un perfil específico mínimo que podemos simplificar con los siguientes requerimientos:

- Experiencia previa acreditada en urgencias y emergencias médicas prehospitalarias y/o formación específica debidamente acreditada por instituciones públicas, sociedades científicas u otras de reconocido prestigio homologadas y/o acreditadas en el ámbito de la emergencia prehospitalaria.
- El personal de medicina y enfermería debía poseer formación acreditada de Soporte Vital Avanzado (SVA) y de Soporte Vital Avanzado en Trauma (SVAT).

- Formación específica en Medicina Subacuática e Hiperbárica igualmente acreditada y capaces de afrontar accidentes en este ámbito.
- Formación básica en rescate urbano.
- Conocimiento del perfil de riesgos en este ámbito.
- Capacitación contrastada en la utilización de los EPI específicos



Ilustración 8: Prácticas del personal sanitario del IEM en técnicas de rescate vertical en un entorno simulado de la zona de trabajo de una tuneladora. Curso específico de seguridad en este ámbito. Foto IEM

- Formación específica en el entorno de trabajo de las tuneladoras con la superación de un test de compresión y descompresión individual que le habilitara para trabajar en el entorno hiperbárico. Todo el personal asistencial debía haber realizado, y superado, un curso específico de riesgos laborales según la normativa vigente en el entorno de la construcción.



Ilustración 9: Prácticas de compresión hiperbárica con O<sub>2</sub> del personal sanitario del IEM

Este perfil se puede encontrar tanto en profesionales de la medicina, de enfermería, así como entre los bomberos o técnicos de emergencias (TE) que hayan superado un proceso de formación específico.

La simple posesión de las titulaciones oficiales respectivas (médico, enfermero/a o TE) no da la garantía de capacitación mínima para trabajar en este entorno complejo específicamente prehospitalario.

Algunas universidades responsables de la formación de nuevos médicos y enfermeros, conscientes de esta realidad, tienen diseñados programas de postgrado, por la especialización en urgencias y emergencias en general, y prehospitalaria en particular.

En el caso del personal médico y de enfermería que participaron en el servicio preventivo del IEM en las obras de la UTE Tuneladora Metro, la práctica totalidad habían superado el Máster en Asistencia Integral en Urgencias y Emergencias del IEM, acreditado por la Universitat de Barcelona (UB) o la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

En este sentido en el IEM se diseñó, y se viene realizando desde el 2006, un curso específico, único en este ámbito, de Actualización en Seguridad y Emergencias en Tuneladoras , de 25 horas presenciales, con la colaboración de la Escuela de Buceo Profesional Océanos y con el soporte de la empresa de buceo profesional InstalSub. Curso reconocido en su momento como de interés sanitario por el Departament de Salut de la Generalitat de Catalunya. (Núm. Registro salida: 9002S/3246/2008) y por el Institut Gaudí de la Construcció (IGC)

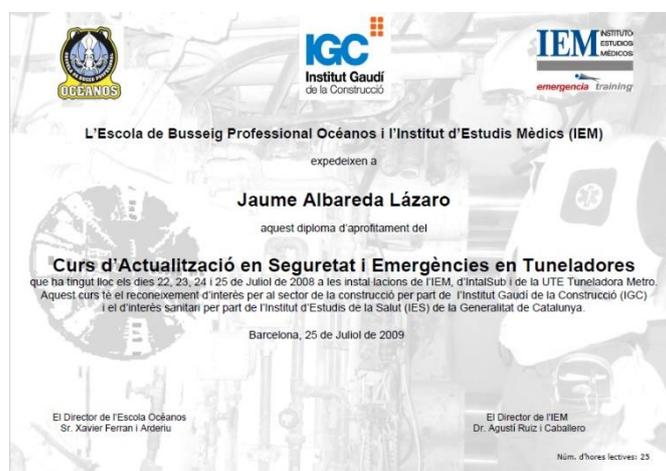


Ilustración 10: Diploma IEM del curso de Actualización en Seguridad y Emergencias en Tuneladoras

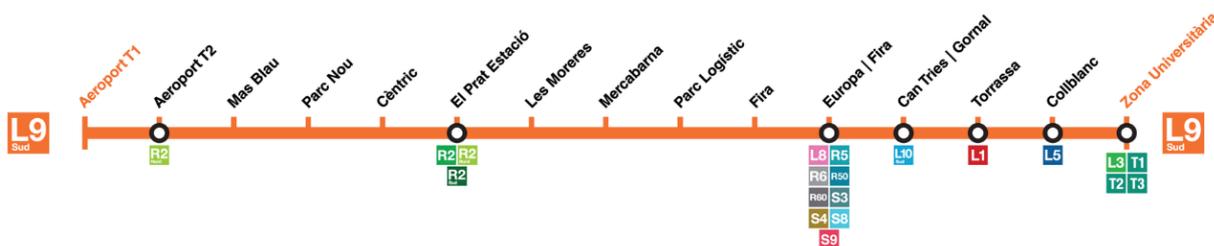
La experiencia de varios años de trabajos en tuneladoras EPBs nos obligaba a insistir en que la simple posesión de las titulaciones oficiales respectivas (médico, enfermero/a o TES) no da la garantía de capacitación mínima para trabajar en este entorno complejo específicamente prehospitalario.

Conscientes del poco conocimiento existente en el sector de las emergencias de este tipo de instalaciones, de los peligros implícitos que conlleva y de la dificultad que puede comportar una intervención de los servicios de emergencia en este ámbito, desde el IEM se trabajó durante años en actividades divulgativas que pudieran facilitar unos elementos mínimos de concienciación y que ayudaran a mejorar su capacidad de intervención. En este sentido más de 300 responsables y miembros operativos de los diversos cuerpos de seguridad y emergencias (policía, bomberos, sanitarios, ingenieros, etc.) participaron, con plazas becadas por el IEM, en los cursos de Actualización en Seguridad y Emergencias en Tuneladoras.

El **Instituto de Estudios Médicos (IEM)**, gracias a su perfil de alta especialización, fue la empresa responsable de los servicios médicos hiperbáricos contratados. El IEM, empresa especializada en urgencias y emergencias médicas, que disponía de un Área de Medicina Subacuática e Hiperbárica con profesionales sanitarios de diferentes categorías (médicos, enfermeros y técnicos) habituados a intervenciones en entornos hostiles, prestaba servicios preventivos sanitarios, de consultoría y de formación.



El IEM disponía ya de una dilatada experiencia en tuneladoras, concretamente en la obra de construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona, adjudicada por GISA a la UTE Tuneladora Metro, constituida por las empresas FCC Const., Scrinser, Obras Huarte Lain, Ferrovial, Agroman, COPISA, Construcciones Pirenaica, y que en uno de sus tramos finalizó en la terminal entre pistas del aeropuerto de Barcelona.



Por otro lado, en el IEM se imparte formación sanitaria especializada en emergencias a todos los niveles. A destacar el Master Universitario en Asistencia Integral en Urgencias y Emergencias para medicina y enfermería. Máster adaptado al Espacio Europeo de Educación Superior (Plan de Bolonia) con 90 créditos ECTS (*European Credit Transfer System*). También se imparte formación a medida, adaptada al lugar de trabajo de cada profesional sanitario (médicos, enfermeras, celadores, etc.) y no específicamente sanitario a todos los niveles, (bomberos, policías, protección civil, submarinistas, maestros, etc. y público en general).

Como responsabilidades específicas se le adjudicaron:

- Los informes o consultas en materia relacionada con la asistencia sanitaria en intervenciones hiperbáricas.
- La redacción de un protocolo de trabajo hiperbárico con la colaboración de la empresa InstalSub y el servicio de prevención de la UTE Túnel Sabadell.
- El Servicio Preventivo de Asistencia Sanitaria de Emergencias, de presencia física, en las intervenciones hiperbáricas de inspección y cambio de herramientas.
- El Servicio Preventivo de Asistencia Sanitaria de Emergencias, de presencia física, en las intervenciones no de inspección y cambio de herramientas.



Ilustración 12: Personal sanitario preventivo del IEM

## **Medios materiales básicos del Equipo Preventivo de Intervención Sanitaria del IEM**

Dada la gran dificultad de acceso para los servicios de emergencias públicos, el Equipo Preventivo de Intervención de Soporte Vital Avanzado (SVA) del IEM presente en el lugar debía disponer de:

- Material electromédico y farmacológico necesario e imprescindible para el abordaje inicial, en situación de emergencias, de un paciente traumático, disbárico y grave en general. En resumen, el propio de un equipo de emergencias de SVA y de SVAT (Soporte Vital Avanzado en Trauma)
- Equipo completo de oxigenoterapia específico para accidentes disbáricos de buceo.
- Material de seguridad personal propio de la obra y del equipo sanitario (EPI)
- Camilla específica tipo NEST, y otros elementos de rescate, para espacios confinados

### **1.2 Interés del proyecto**

Este trabajo se plantea a partir de la existencia de un escenario de trabajo de alto riesgo que presenta serias deficiencias en la seguridad como, por ejemplo:

- La falta de conocimiento del perfil de riesgos evidentes en este tipo de trabajo en los profesionales de las emergencias.
- La práctica ausencia de estudios previos en este ámbito de trabajo de alto riesgo.
- La falta de procedimientos de seguridad estandarizados en tunneladoras hiperbáricas y/o la necesidad de concreción y mejora evidente de los existentes elaborados de forma aislada.
- La dificultad de acceso e intervención, en el supuesto de un incidente grave, de los equipos de emergencia y rescate externos.
- La falta de formación específica en este ámbito de los mencionados equipos de emergencia.

El interés principal del proyecto gira alrededor de demostrar que la implementación de medidas preventivas específicas en este ámbito, vinculadas tanto a la medicina hiperbárica como a la medicina de urgencias y emergencias, disminuye significativamente la accidentabilidad.

Medidas en las que la formación específica previa y de calidad tanto de los trabajadores hiperbáricos como de los servicios preventivos y de intervención es imprescindible.

Por otro lado, se pretendía demostrar que la cooperación entre las empresas constructoras de túneles, los fabricantes de tuneladoras EPBs y de otros componentes necesarios, las empresas de buceadores profesionales, el alto nivel de preparación de los buzos, los ingenieros, los técnicos y de los servicios sanitarios y la formación específica impartida inicial y continua fueron determinantes en la eficiente construcción de estos túneles con altos niveles de seguridad.

## **1.3 Descripción del entorno de trabajo**

### **1.3.1 Marco legal vigente en el momento del estudio**

El marco legal vigente más significativo, en el momento de la obra, y relacionado con el entorno de trabajo, los riesgos laborales y la seguridad del personal era:

- Orden 25 abril 1973 (BOE 173 de 20-07-1973) por la que se aprueba el Reglamento para el Ejercicio de las Actividades Subacuáticas en Aguas Marítimas e Interiores.
- Ley 2/1985 de 21 de enero, sobre Protección Civil – Orden del 29 de noviembre de 1984 del Ministerio del Interior, sobre “Manual de Emergencia y Evacuación, Guía para la elaboración del Plan de Emergencia contra incendios y evacuación en locales y edificios”.
- RD 863/1985 “Reglamento General de Seguridad Minera”.
- Real Decreto 1378/1985, del 1 de agosto, sobre “Medidas provisionales para la actuación en situaciones de Emergencia, en los casos de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública”.
- Real Decreto 952/1990, de 29 de Julio, por el que se modifica los Anexos y se completan las Disposiciones del R.D. 886/1998, de 15 de Julio.
- Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la “Norma Básica de Protección Civil”.
- Orden de 18 de diciembre de 1992 por la que se establecen requisitos, conocimientos y medios mínimos exigibles para la obtención de las titulaciones de buceo profesional.

- Real Decreto 1942-1993. Reglamento de las instalaciones de protección contra incendios y Normas U.N.E. citadas en el mismo. – Norma Básica de Edificación para la Protección Contra Incendios.
- Real Decreto 727/1994, de 22 de abril, por el que se establece el Título de Técnico en Buceo de Media Profundidad y las correspondientes enseñanzas mínimas.
- Real Decreto 750/1994, de 22 de abril, por el que se establece el currículo del ciclo formativo de grado medio correspondiente al título de Técnico en Buceo a Media Profundidad.
- Ley 31/1995 sobre Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 901/1995, de 2 de junio, de traspaso de la Administración del Estado traspasó a la Generalitat de Catalunya de las funciones y servicios en materia de enseñanza náutica y subacuática.
- Ley de prevención de riesgos laborales, ley 31/1995, de 8 de noviembre B.O.E. nº 269, de 10 de noviembre.
- Llei 4/1997, de 20 de maig, de protecció civil de Catalunya.
- Orden del Ministerio de Fomento de 14 octubre 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas (BOE Núm. 280, de 22-11-1.997).
- Real Decreto 1389/1997 “Disposiciones mínimas de seguridad y salud de los trabajadores en actividades mineras”.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
- Real Decreto 39/97 por el que se aprueba el Reglamento de Servicios de Prevención.
- Real Decreto 780/98 por el que se modifica el R.D. 39/97 anterior.
- Real Decreto 886/1998, de 15 de Julio, de Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría de Gobierno, sobre “Prevención de Accidentes Mayores en determinadas actividades industriales”.
- Orden de 19 de noviembre de 1998 “Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS 98)”.
- Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Obras Subterráneas para el Transporte Terrestre (IOS. 98), (BOE del 1-12-98).
- Resolución de 20 de enero de 1999, de la Dirección General de la Marina Mercante, por la que se actualizan determinadas tablas de la Orden de 14 de

octubre de 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas. (BOE núm. 42 del 18-02-1999).

- Orden 20 Julio 2000 por la que se modifican, para el buceo científico, las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas aprobadas en la Orden de 14 de octubre de 1997 (BOE 07-08-2000).
- Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales. BOE núm. 298 de 13 de diciembre.
- Real Decreto 366/2005, de 8 de abril, por el que se aprueba la Instrucción técnica complementaria MIE AP-18 del Reglamento de aparatos a presión, referente a instalaciones de carga e inspección de botellas de equipos respiratorios autónomos para actividades subacuáticas y trabajos de superficie (BOE núm. 100 de . 27-04-2005).
- Real Decreto 393/2007 Norma básica de autoprotección.
- Real Decreto 1696/2007, de 14 de diciembre, (BOE n. 313 de 31/12/2007). por el que se regulan los reconocimientos médicos de embarque marítimo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Decret 82/2010 d'autoprotecció de la Generalitat de Catalunya.
- Ley 2/2010 de Pesca y Asuntos Marítimos de Catalunya.
- Orden EDU/2450/2011, de 5 de septiembre, por la que se establece el currículo de los ciclos inicial y final de Grado Medio correspondientes al título de Técnico Deportivo en buceo deportivo con escafandra autónoma.
- Resolución de 25 de enero de 2012, de la Dirección General de Empleo, por la que se registra y publica el II Convenio colectivo de buceo profesional y medios hiperbáricos. (BOE 37 de 13-02-2012).
- Normas U.N.E. aplicables.
- Sentencias del Tribunal Constitucional.

### 1.3.2 **Tuneladoras. Conceptos básicos**

Una tuneladora, T.B.M. (del inglés Tunnel Boring Machine) es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de la entibación para la sustentación del túnel, si ésta es necesaria, ya sea de forma provisional o definitiva.

La excavación se realiza normalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos (alimentados a su vez por motores eléctricos, dado que la alimentación general de la máquina se realiza con

energía eléctrica), aun cuando también existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabeza giratoria. El empuje necesario para adelantar se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado o en zapatas móviles (denominadas *grippers*), accionados también por gatos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se consigue un punto fijo desde donde empujan.

Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa una instalación tuneladora constituida por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que, a menudo, ruedan sobre rieles que la misma tuneladora coloca, donde se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

Los rendimientos conseguidos con tuneladoras de cabeza giratoria son elevadísimos si se comparan con otros métodos de excavación de túneles, pero su uso no es rentable hasta una longitud mínima de túnel a excavar. Es decir, hace falta amortizar el precio de la máquina y calcular el tiempo que se tarda en diseñarla, fabricarla, transportarla y montarla (que puede llegar a los dos años). Además, los túneles a excavar con tuneladora tienen que tener radios de curvatura elevados porque las máquinas no pueden hacer curvas cerradas, y la sección tiene que ser circular en túneles excavados con cabeza giratoria.

Se distinguen tres grandes grupos:

- **Topos**

Los topos son tuneladoras diseñadas para excavar rocas duras o medianas, sin demasiadas necesidades de sostenimiento. Su diferencia fundamental con los escudos es que no están dotados de un cilindro de acero tras la rueda de corte que realiza la función de entibación provisional.

La fuerza de empuje se transmite a la cabeza de corte mediante cilindros de empuje. La reacción producida se transmite al hastial del túnel mediante los *grippers* (fuerza de anclaje). Los *grippers* también compensan el par producido por la cabeza de corte, que se transmite a éstos a través de la viga principal.

Cuando se ha terminado un ciclo de avance, se necesita reposicionar las zapatas de agarre (*grippers*), para la cual se apoya la viga principal en el apoyo trasero. Una vez anclados los *grippers* en su nuevo emplazamiento, se libera el apoyo trasero y se inicia un nuevo ciclo de avance.

- **Escudos**

Los escudos son tuneladoras diseñadas por excavar rocas blandas o suelos, terrenos que necesitan sistemáticamente la colocación de un sostenimiento. A diferencia de los topos, los escudos cuentan con una carcasa metálica exterior (que da el nombre a este tipo de máquina) que sostiene provisionalmente el terreno desde el frente de avance hasta algo más allá de donde se coloca el sostenimiento definitivo, normalmente consistente en anillos formados por unas dovelas. De este modo, se garantiza en todo momento la estabilidad del túnel. A menudo están preparadas para avanzar bajo el nivel freático.

Si se trata de una tuneladora de cabeza giratoria, suele estar equipada con picas, rastreles o "*rippers*" (elementos que arrancan los suelos) y cortadores (elementos que rompen la roca). También dispone de una serie de aperturas, frecuentemente regulables, por donde el material arrancado pasa a una cámara situada tras la rueda de corte y desde donde se transporta posteriormente hacia el exterior de la máquina.

Tras esta cámara se alojan los motores y el puesto de mando de la máquina, espacios completamente protegidos por la carcasa metálica.

Seguidamente está todo el sistema de perforación: primero los cilindros perimetrales (con un recorrido entre 1,20 y 1,50 m). Estos gatos perimetrales se apoyan contra el último anillo colocado de dovelas del revestimiento definitivo del túnel. Cuando finaliza el recorrido de los cilindros de avance, se coloca un nuevo anillo de dovelas (en el interior de la carcasa, que se extiende algo más allá, de forma que el túnel siempre está sostenido) y se empieza un nuevo ciclo de excavación. Una inyección de mortero o grasa es necesaria para llenar el vacío de 7 a 9 cm de grueso entre las dovelas y el terreno excavado.

Se distinguen varios grupos de escudos, de entre los que se distinguen las tipologías que se explicitan a continuación:

1. **Escudos de frente abierto:** se usan cuando el frente del túnel es estable. El sistema de excavación puede ser manual, mediante brazo fresador, con un brazo excavador o con una cabeza giratoria. En algunos casos, se puede colaborar con la estabilidad del frente una vez acabado cada ciclo con unos paneles a modo de reja. Con este tipo de máquina, si la cabeza no es giratoria, es posible trabajar con secciones no circulares.

2. **Escudos de frente cerrado:** se usan cuando el frente del túnel es marcadamente inestable, por ejemplo, en terrenos no cohesivos, saturados de agua, etc. La sección excavada ha de ser circular. tiene varios tipos:
- a. **Escudos con cierre mecánico:** la entrada y salida de material en el cuarto de tierras se regula mediante dos puertas de apertura controlada hidráulicamente. La máquina tiene limitaciones con presencia de agua.
  - b. **Escudos presurizados con aire comprimido:** prácticamente no se usan.
  - c. **Escudos de bentonita o hidroescudos:** con la inyección de bentonita se consigue estabilizar el terreno por sus propiedades tixotrópicas y facilitar el transporte de material mediante bombeo.
  - d. **Escudos de balance de presión de tierras o EPBs:** el material es extraído del cuarto de tierras mediante un tornillo de Arquímedes. Variando la fuerza de empuje de avance y la velocidad de extracción del tornillo, se consigue controlar la presión de balance de las tierras, para que ésta garantice la estabilidad del frente y se minimicen los asentamientos en superficie. Para facilitar la evacuación de productos poco plásticos con tornillos, a menudo se han de inyectar productos químicos por aumentar la plasticidad de los terrenos. Hoy en día, las EPB son la tecnología predominante en cuando a excavación de túneles bajo nivel freático.

- **Dobles escudos:**

Otra modalidad de tuneladora es la denominada Doble Escudo, capaz de trabajar como topo o como escudo, en función de la calidad del macizo rocoso, siendo la mejor solución para macizos con tramos de tipología variable suelo-roca. En este tipo de tuneladoras el escudo está dividido en dos partes, la delantera en la que se encuentra la cabeza de corte, y la zona trasera en la que se realiza el montaje del anillo de dovelas.

### 1.3.3 Las tuneladoras EPBs (*Earth Pressure Balance*)

La tuneladora EPBs (*Earth Pressure Balance*), o de Equilibrio de Presión de Tierras, han sido las utilizadas durante los años 2007 al 2011 en Catalunya. Se caracterizan por la especificidad de trabajar manteniendo el frente de excavación presurizado para evitar desprendimientos en la cabeza de corte. Esta peculiaridad tiene como objetivo, entre otros, evitar la aparición de cavernas exteriores al anillo de perforación y asentamientos

del terreno que podrían afectar a las infraestructuras y edificios próximos a la excavación.



Ilustración 13: Imagen del escudo de la tuneladora, previa al inicio de las obras, en la visita formativa del personal sanitario del IEM y de miembros de la unidad subacuática de la Policía de Catalunya (Mossos d'Esquadra)

El sostenimiento del frente de excavación se realiza con la propia tierra excavada, que se aloja en una cámara de extracción para mantener la presión sobre el frente y minimizar asentamientos en superficie. Esta función se puede reforzar añadiendo espumas al material extraído, lo cual amplía la aplicabilidad de la máquina, al aumentar la plasticidad de los terrenos.

Las tuneladoras EPBs utilizan el escombros de la excavación ubicado en la cámara de extracción para mantener la presión sobre el frente con el fin de evitar subsidencias en la superficie. El escombros es transportado al pozo de ataque mediante cinta o vagonetas.

El material se extrae mediante un tornillo de Arquímedes, que en función de su velocidad de extracción y bajo el control de la fuerza de avance proporcionada por los cilindros de propulsión, permite controlar la presión de balance de las tierras. El material excavado se deposita en una cinta transportadora a través de un tornillo sinfín. El transporte del material al exterior se realiza mediante vehículos sobre raíles o camiones. Actuando sobre la velocidad del mismo y sobre la fuerza de los cilindros de empuje podemos mantener una presión constante sobre el frente que permita construir un túnel sin incidencias en las infraestructuras colindantes de la superficie.

El sostenimiento definitivo del túnel se consigue mediante un revestimiento de dovelas prefabricadas, formadas normalmente por unas siete piezas.

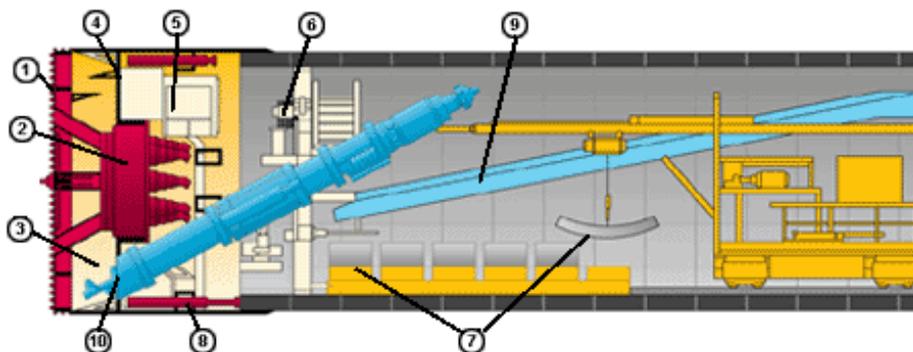


Ilustración14: Dovelas utilizadas en las tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance). Foto IEM

### 1.3.3.1 Componentes básicos de una tuneladora EPBs

Los componentes de una EPBs con revestimiento con dovelas pueden dividirse en tres estructuras principales bien diferenciadas:

- Escudo y rueda de corte
- El *back up*
- El tren de avance:



Esquema global de una tuneladora EPBs

- |                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| 1 Rueda de corte             | 6 Erector de dovelas      |
| 2 Accionamiento              | 7 Dovelas                 |
| 3 Cámara de excavación       | 8 Cilindros de propulsión |
| 4 Sensor de presión          | 9 Cintas transportadoras  |
| 5 Esclusa de aire comprimido | 10 Sinfín de extracción   |

**El escudo** es la parte principal de la tuneladora. Aquí se aloja el accionamiento de la rueda de corte, los cilindros de empuje y los de orientación que guían la tuneladora, el tornillo sinfín, el erector de dovelas para construir el revestimiento del túnel y la esclusa presurizada, entre otros.



Imágenes del escudo y la cabeza de corte de una tuneladora EPB (Earth Pressure Balance) de la Línea 9 del metro de Barcelona en un momento de la visita formativa del personal operativo del IEM. Fotos IEM

**El back up**, que normalmente tiene más de 80 m de longitud, aloja la cabina de mando, los motores principales, todos los paneles eléctricos de control, la cinta de extracción de tierras, la ventilación, el transformador eléctrico, el equipo inyector de espuma y mortero, así como las vías del tren.



Tuneladora Dulcinea (Herrenknecht EPB Shield S-300). 4.364 toneladas de peso, longitud: 100 m (aprox.), diámetro exterior: 15,20 m, empuje: 316.000 kN, rendimiento máximo: 36 m/día y una potencia de 22.000 kW

**El tren** que está movido por una locomotora eléctrica o diésel parecida a las utilizadas en numerosas explotaciones mineras. Dispone de vagones para la extracción de

escombros, así como de un vagón de mortero para el relleno, un vagón plano para el transporte de material y uno específico para el transporte del personal operativo.



Imágenes del tren con un vagón plano para el transporte de material, y/o de personal, de una de las tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance) de la Línea 9 del metro de Barcelona. Fotos IEM

### 1.3.3.2 Parámetros de avance de la tuneladora

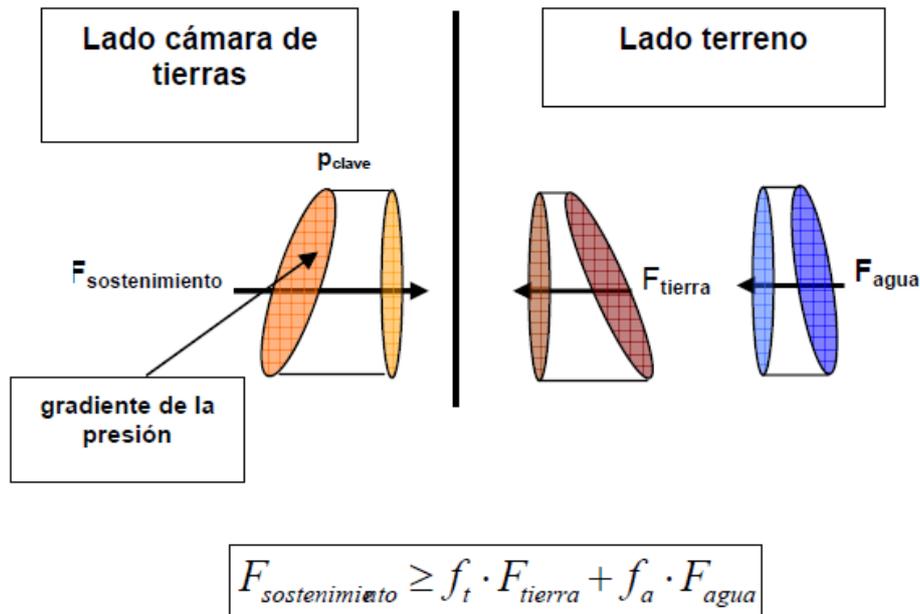
La tuneladora estaba dotada de una serie de sensores, celdas de presión, caudalímetros, básculas etc. para medir los valores instantáneos de varios parámetros importantes para el control de su avance y guiado.

Estos datos eran leídos, visualizados y registrados cada 10 segundos por diferentes equipos que los enviaban a un programa que creaba un fichero consultable en formato ASCII a final de excavación y montaje de cada anillo.

El procedimiento de trabajo de la tuneladora se caracterizaba por el empleo y la posible variación de diferentes parámetros de funcionamiento de la máquina. Entre ellos, y atendiendo al papel que juegan en este estudio, destacamos:

- **Presiones de confinamiento de las tierras en la cámara (bar) o presión de trabajo**

La presión de trabajo de una tuneladora a presión de tierras (EPB) es la presión aplicada en la cámara de tierras para sostener el frente. Está presión resulta de un cálculo geomecánico para estimar las presiones horizontales en la sección del túnel como ilustrado en la siguiente figura.



La fuerza de sostenimiento tenía que estar por encima de la suma de las resultantes de la presión de tierra y del agua.

La presión de tierras en la cámara de excavación estaba controlada mediante:

- La velocidad de avance del escudo (penetración, par y empuje)
- La velocidad de extracción del material excavado (tornillo sinfín)
- Grado de fluidez del material en la cámara (densidad del material acondicionado).

El control constante de las presiones del frente, incluso durante la construcción del anillo de dovelas, reduce la relajación de tensiones en el material por delante de la tuneladora, minimizando la generación de asientos.

El avance de la tuneladora se realizó con la cámara de excavación llena de tierras, manteniendo en todo momento la presión de tierras en la clave (P1).

Durante el montaje de anillo se tenía que controlar el descenso de presión producido por fenómenos de sedimentación del material en la cámara de excavación o por disipación del efecto de las espumas que contienen aire inyectado, así como por el efecto de la recolocación de los gatos de empuje durante la colocación del anillo.

La tuneladora estaba dotada de un dispositivo automático de inyección de bentonita a la cámara, que mantendrá en cualquier momento la presión en el rango definido de

valores de presión. En caso de fallo del suministro eléctrico de la tuneladora, se paralizará el proceso de excavación.

Respecto a la densidad del material de la cámara de excavación, cabe destacar que para una correcta gestión de las presiones se necesitaba un gradiente lo más constante posible en toda la cámara, signo de una buena mezcla y homogeneidad del material que actuaba como soporte del frente.

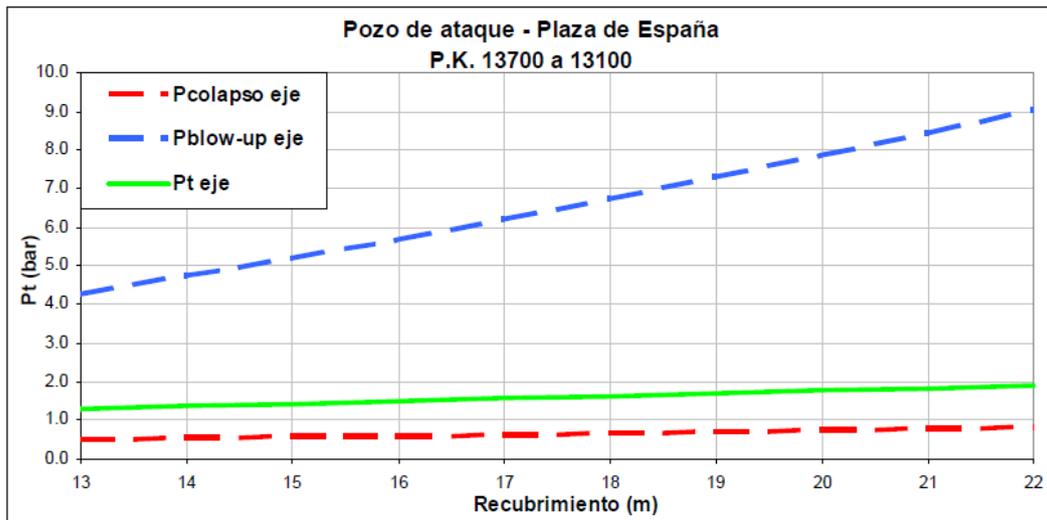
La densidad en la cámara se determinaba a partir del gradiente de presiones medido en los 6 sensores de presión distribuidos por la cámara de excavación, así como indicados en la siguiente figura y vista del panel de control del piloto. En algunos casos las celdas se podían obstruir y que marquen valores no reales.



Distribución de los sensores de presión

La tuneladora S510 estaba equipada con dos células de presión en la parte externa tanto del escudo delantero como en el escudo intermedio. La función de estos sensores es corroborar el sostenimiento activo del terreno que está sobre los escudos y controlar que no haya ningún colapso de este.

Se calculó un rango de presiones de trabajo en el eje de la tuneladora con límite inferior de colapso y superior de “*blow-up*” según la potencia del recubrimiento. Los resultados de este análisis están ilustrados en la gráfica siguiente:



- **Presión de contacto de la rueda de corte con el frente de excavación**

La fuerza entre la cabeza de corte y el terreno era un parámetro importante para la interpretación del estado de las herramientas. En condiciones geológicas constantes, la fuerza de la cabeza de corte cambiaba con la variación de la penetración.

- **Volumen del mortero de cola (m<sup>3</sup>/anillo)**

El vacío o “gap” entre el externo de los anillos y el perfil excavado, tenía que ser rellenado completamente con mortero. Este mortero se inyectaba continuamente con el avance de la tuneladora a través de 6 líneas de inyección activas (A1-A6) mas 6 de reserva (R1-R6), colocadas en el escudo de cola y alimentadas por 3 bombas (B1-B3) de mortero instaladas en el primer carro del back-up.

- **Presión de inyección del mortero de cola (bar)**

Mientras las presiones de trabajo aplicadas en el frente sostienen las presiones horizontales del terreno, en el punto de la clave la presión de la inyección del mortero tenía que sostener las presiones verticales. Por esta razón la presión del mortero tenía que superar la presión de trabajo P1. En general se aplicaba una presión en clave superior a la presión de trabajo P1 + unos 0,5-0,8bar. El sistema de inyección estaba dotado con sensores de presión cerca de la salida de la bomba y también un poco antes de las líneas de inyección que pasan por el escudo.

- **Inyección de bentonita por coraza (m<sup>3</sup>/anillo)**

Para minimizar las deformaciones del perfil excavado debidas al menor diámetro y pequeña conicidad del escudo (6,78m delantero y 6,76m trasero) y a la junta entre sus componentes, la tuneladora S510 estaba equipada con un sistema de inyección de bentonita por coraza. La bentonita tenía la función de rellenar estos *gaps* y mantener el perfil excavado estable y sin deformaciones.

La bentonita producía un puente entre la presión al frente y la presión del mortero inyectado por cola, evitando así pérdidas de presión debidas a la fluidez de espuma o de mortero en la grieta entre el escudo y el perfil excavado.

- **Peso del material extraído en cada avance**

El material extraído es pesado en [t] a través de 2 básculas instaladas en la cinta transportadora del *backup*.

- **Penetración de la tuneladora en el terreno (mm/rpm)**

La velocidad de avance de una tuneladora estaba medida por la elongación de los gatos de empuje por tiempo en [mm/min]. La tuneladora S510 tenía una velocidad máxima de penetración de 100mm/min.

La penetración resultaba de la velocidad de avance y de la velocidad de rotación de la rueda de corte, que era otro parámetro de mando de la tuneladora.

- **Empuje de los gatos**

La tuneladora avanzaba empujando contra del anillo de dovelas montado en su escudo de cola con 19 parejas de gatos hidráulicos colocados en la cola del escudo intermedio y alimentados por 4 bombas.

- **Espumas**

Acondicionar el terreno en el frente y en la cámara favorecía su estabilidad, excavación y extracción, reduciendo a la vez el desgaste de las herramientas de corte y el par de la máquina.

Por estas razones se inyectaban espumas directamente en el frente y en la cámara, donde se mezclaba el terreno excavado y acondicionado junto a agua en presión, para conseguir una masa de consistencia, homogeneidad y plasticidad adecuada para su extracción.

La ventaja de utilizar espumas era entonces uniformar la presión de las tierras, mejorando así la estabilidad del frente y reduciendo el par y desgaste de la rueda de corte y la fricción y desgaste en el tornillo sinfín.

- **Guiado de la Tuneladora (VMT)**

La tuneladora está dotada de un sistema de guiado que indica al piloto la posición y la orientación de la tuneladora respecto al eje de proyecto en tiempo real.

#### **1.3.4 Mantenimiento, inspección y reparación de las tuneladoras**

Como se comentó con anterioridad, los motivos que pueden comportar una intervención hiperbárica en el frente de excavación de estas tuneladoras son:

- Trabajos de inspección.
- Trabajos de mantenimiento programados.
- Trabajos de reparación de urgencia.

Un entorno hiperbárico en la zona de trabajo comporta una dificultad añadida en los trabajos de mantenimiento y recambio, entre otros, de las herramientas de corte de la tuneladora.

##### **1.3.4.1 Revisión de Herramientas en ambiente hiperbárico**

Los trabajos en condiciones hiperbáricas son necesarios para inspeccionar y, si es necesario, realizar el mantenimiento/reparación de la rueda de corte, cuando no existe la posibilidad de realizar la inspección en abierto (depende de las características del terreno a excavar en cada caso o dentro de los pozos o estaciones).

En general, las inspecciones se planificaron para realizarse cada 500 metros. En el caso de observarse anomalías durante la excavación, se planteaba una intervención no programada.

Como norma básica los trabajos hiperbáricos, en cualquier caso, debían efectuarse con garantías de no afectar a terceros en superficie.

Es en este sentido que todos los procedimientos de ejecución de la obra estaban estandarizados.

Durante toda la operación, hasta tener excavados 5 anillos después de la intervención, debía haber en la superficie, donde correspondía a la zona posiblemente afectada por la tuneladora, un supervisor que pudiera comunicarse directamente con la cabina de la tuneladora en el caso que se detecte alguna anomalía (pérdida de aire, salida de espuma o mortero, movimientos en superficie...).

En el caso de intervenciones de riesgo, se limitaba adecuadamente la posible zona afectada en superficie. En el caso de ser vía pública, se debía de establecer previamente el desvío de tránsito correspondiente. Durante una intervención de riesgo, se limitaba totalmente el acceso a la zona de afectación del personal ajeno a la obra

A continuación, se detallan los principales pasos:

- **Funcionamiento del sistema de compresores**

Los compresores son los responsables de alimentar la tuneladora con aire a presión. La tuneladora S-510 se alimentaba de aire comprimido mediante los siguientes compresores:

- Un compresor externo a la tuneladora con una presión de funcionamiento de 12 bar. Tenía una potencia nominal de 90 kW y un caudal de 720 m<sup>3</sup>/h.
- Un compresor de emergencia externo a la tuneladora con una presión de funcionamiento de 12 bar, una potencia nominal de 90 kW y un caudal de 720 m<sup>3</sup>/h.

El “Samson” de aire de la tuneladora podía alimentarse de cada uno de estos grupos de compresores de forma individual o de todos al mismo tiempo.

Las posibles pérdidas de aire en el frente durante las intervenciones hiperbáricas se monitorizaban, indicando la medición de presión del alimentador del “Samson”, que mediante su sistema de pilotaje conseguía graduar la presión de entrada. Cuando el “Samson” detectaba que bajaba un cierto grado la presión, abría el paso e introducía más caudal de aire consiguiendo llegar a la presión de trabajo definida anteriormente.

En el caso de superar un cierto nivel de pérdida de aire, el compresor de emergencia aumentaba su régimen de funcionamiento, aportando más caudal de aire.

Según la situación y en cada caso particularmente se valoraba y se decidía si es necesario abortar la intervención.

- **Ejecución del “cake” de bentonita**

Se realizaba la excavación normal y construcción del anillo antes de realizar el “cake”, en la cual la extensión máxima de los cilindros de empuje era la necesaria para la construcción habitual del anillo (teniendo en cuenta siempre de tener la menor extensión posible)

Esta operación se realizaba sin inyectar espumas en el frente, hasta alcanzar una presión de trabajo:  $P_o = P_1 + 0,2 \text{ bar}$  aprox.

Se procedía a extraer material con el tornillo sinfín, sin girar la rueda de corte e inyectando a la vez bentonita en el frente.

Una vez se había alcanzado la presión deseada, se retraía el escudo delantero unos 150mm aprox., manteniendo la presión en la cámara con la bomba de bentonita durante 20 min. Se seguía girando la rueda de corte a una velocidad de 0.3-0.5 rpm.

A continuación, se detenía la rotación de la rueda de corte, y con el sistema de inyección “Samson” se controlaba que la presión en el frente fuera la presión de trabajo observando si se producían pérdidas importantes, como mínimo, durante unos 15 minutos.

Seguidamente se procedía al vaciado de la cámara de excavación por sustitución de bentonita con aire, hasta llegar al nivel inferior de la compuerta del mamparo, lentamente y siempre controlando el caudal de entrada de aire y el pesaje de material extraído.

Se comprobaba que el nivel de material haya llegado a una cota inferior a la de la compuerta del mamparo ( $P_1 = P_2 = P_3$ ) mediante la válvula que se encuentra debajo de la compuerta.

Una vez finalizada la extracción de material y comprobado que no había pérdidas de aire en el frente, se iniciaba el proceso de entrada a la cámara y el trabajo del

personal especializado (trabajadores hiperbáricos y equipos sanitarios de emergencias).

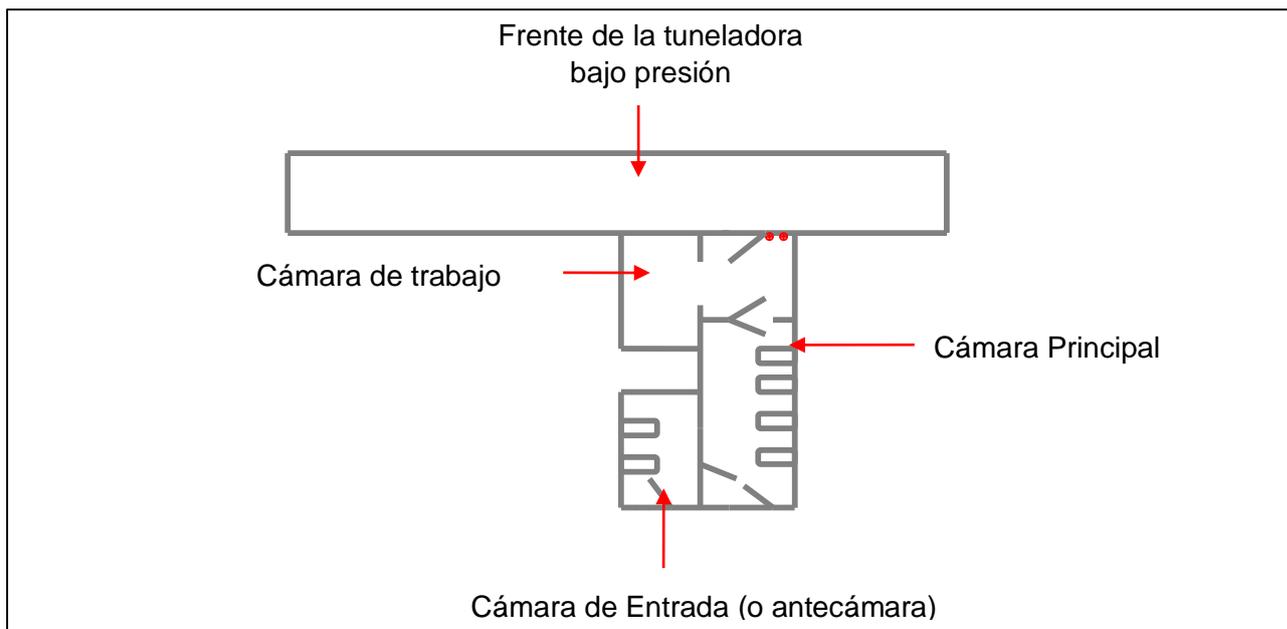
- **Inspección técnica de la cámara hiperbárica.**

En el caso que el frente resultara estable durante, por lo menos, 15 minutos y se hubiera alcanzado la presión de entrada a la cámara hiperbárica, se realizaba una inspección rutinaria de la cámara por parte del camarista y su ayudante antes de permitir la entrada del personal.



Acceso a la cámara hiperbárica de la tuneladora EPBs de la UTE Tuneladora Mero. Foto IEM

En caso contrario, se debía rellenar la cámara de excavación con bentonita sin extraer material para poder mantener la presión de trabajo P1. Sólo habiendo llegado a este punto, se podía desconectar el “Samson”. Para volver a intentar realizar otro “cake”, había que realizar un mínimo de 2 anillos.



Esquema de zona de trabajos hiperbáricos, esclusa presurizada, con la cámara y la antecámara hiperbárica, en una tuneladora EPB (Earth Pressure Balance) de la línea 9 del metro de Barcelona

- **Test de compresión hiperbárica del personal sanitario preventivo**

Previamente a la intervención de los trabajadores hiperbáricos el personal preventivo, médico/a, enfermero/a y técnico sanitario debían superar un test de compresión hiperbárica que confirmara que estaban en disposición física y técnica de poder intervenir ante una emergencia en la zona de presión.

- **Control de constantes y estado físico de los trabajadores hiperbáricos**

También previamente a la intervención hiperbárica, el personal sanitario del IEM efectuaba un control básico del tipo de intervención y del estado físico de cada uno de los buceadores objeto del presente estudio.



Control de constantes y estado físico de los trabajadores hiperbáricos. Foto IEM

Las variables de control hiperbárico y exploración física que fueron tomadas a pie de tuneladora, justo antes de acceder a la cámara hiperbárica fueron:

- Nombre y apellidos
- Edad
- Datos de la intervención hiperbárica:
  - Hora de entrada
  - Hora de salida
  - Presión
  - Tiempo en el fondo
  - Paradas de descompresión
  - Tiempo de administración de O<sub>2</sub>
- Exploración física:
  - Frecuencia cardíaca (FC)
  - Presión arterial (PA)
  - Frecuencia respiratoria (FR)
  - Temperatura (Temp °C)
  - Saturación de oxígeno (SpO<sub>2</sub>)
  - Carboxihemoglobina (SpCO)
  - Metahemoglobina (SpMet).
- Datos y firma del personal sanitario asistencial
- Datos y firma del buceador camarista y del jefe de equipo de los buceadores.
- Observaciones

### 1.3.5 Antecedentes históricos previos en la utilización de las tuneladoras EPBs a la tuneladora objeto de este estudio

(Según los datos de Nordseetaucher GmbH del Hyperbaric Tunnel Construction and Diving®)

1994	Europipe I and II, North Sea-Germany
1997	Bewagtunnel, Berlin-Germany
1997 – 2000	S-108 4th tube of River Elbe, Hamburg-Germany
1998 – 2002	S-137 Westerschelde Tunnel, Zeeland-The Netherlands
1999	M-498 Mompas, San Sebastian-Spain
2000 – 2001	S-152 Wesertunnel, Nordenham-Germany
	S-149 Airporttunnel, Zürich-Switzerland
	S-140 Bahn 2000-Thalwil, Zürich-Switzerland
2000	S-127 Socatop, Paris-France
	M-532 Crosswaytunnel-4th tube of River Elbe, Hamburg-Germany
	S-110 Fernbahntunnel, Berlin-Germany
2001	Neva-Crossing, St. Petersburg-Russia
2001 – 2002	S-164 Lefortovo Tunnel, Moscow-Russia
	S-150 Sophiaspoortunnel, Rotterdam-The Netherlands
	S-168 Pannerdenschkanaal, Arnhem-The Netherlands
2002	S-205 Peristeri Metro, Athens-Greece
	M-518 TENP Los 4/5, Lörrach-Germany
	S-170 Deep Sewerage, Singapore
2002 – 2003	S-192 CTRL-Thames Tunnel, London-England

	S-175 Oenzbergtunnel, Switzerland
	S-200 Herrentunnel, Lübeck-Germany
2003	S-209 Aanlegspoortunnel, Antwerpen-Belgium
	S-185 Heathrow Airport Tunnel, London-England
	S-187 Metrotunnel, Caracas-Venezuela
2003 – 2007	S-250 Silberwald, Moscow-Russia
	S-290 Silberwald, Moscow-Russia
2004	S-127 Socatop, Paris-France
	S-242 Metro Line 3, Guangzhou-China
2004 – 2005	S-252 Smart Tunnel, Kuala Lumpur-Malaysia
	S-238 Metro Line 1, Napoli-Italy
	M-929 Kura West River Crossing, Azerbaijan
2004 – 2007	S-221 Metro Line 9, Barcelona-Spain
2004 – 2006	S-255 Metrotren, Gijon-Spain
2005	Medientunnel Leipzig-Germany
2005 – 2006	S-258 Flughafen S-Bahn Hamburg-Germany
	S-302 Metro de Madrid-Spain
2006	M-675 La Malata, A Coruña-Spain
	S-327 Harbour Tunnel, Durban-South Africa
	S-320 Almatymetrohurylys, Alma Ata-Kasachstan
	M-614 Chateau d'Olonne, France
	S-324 Metrotunnel, Ankara-Turkey

	S-325 Metrotunnel, Istanbul-Turkey
2006 – 2007	S-331 Fernwärmehöhle, Copenhagen-Denmark
	S-314 Stadtbahn Köln Los Nord, Cologne-Germany
	S-321/22 Stadtbahn Köln Los Süd, Cologne-Germany
	S-127 Socatop, Paris-France
	S-328 Metro Strogino, Moskau
2007	S-317/18 Traffic Tunnel Shanghai-China
	M-971 Wuhan, China
	M-1016 Santander, Spain
	S-264/65 Katzenbergtunnel, Germany
2006 -2008	S-260 Metrobus, Brescia-Italy
	S-326 City Tunnel Leipzig-Germany
	S-340/41 Citytunnel, Malmö-Sweden
2007 -2008	S-334 U-Bahn Linie 3, Munich-Germany
	S-389 Thun, Switzerland
	S-227/28 Metro Esfahan-Iran
2008	M-1198M Doha-Qatar, Persian Gulf
	S-407 Water Tunnel Shanghai-China
	M-518M Pescanova Fishfarm, Mira-Portugal
	S-358 Yellow River Tunnel, China
2007-2009	S-352 H3-4 Münster / Wiesing-Austria
	S-381 H8 Jenbach-Austria

2008-2009	S-349/50 Nanjing Yangtze River Crossing-China
	M-1193 RS2 H8 Jenbach-Austria
	RS4 H8 Jenbach-Austria
	S-440 U4 Hafencity, Hamburg-Germany
	S-419/20 Finnetunnel, Erfurt-Germany
	M-254M Sammler Ost, Hamburg-Germany
2009	S-307/08 Metro Tunnel Singapore
	S-408 Water Tunnel Shanghai-China
	Emstunnel, Emden-Germany
	Railway Tunnel Schlüchtern-Germany
	RS5 H8 Jenbach-Austria
	RS6 H8 Jenbach-Austria
	S-477 CREC Tunnel Foshan-China
	M-907M Weinbergtunnel Zürich-Schweiz
	S-464 Diabolo Tunnel Brussels-Belgium
	S-354 Metro Line 4 Budapest-Hungary

A destacar el 4º túnel del Río Elba (1997 – 2000) que fue un hito en este tipo de tuneladoras por su gran diámetro (14,2 metros) y por soportar presiones de hasta 4,5 bares.

La excavación se desarrolló en depósitos glaciares con arena, margas, arcillas, cantos rodados y rocas. Se realizaron numerosas intervenciones hiperbáricas para el mantenimiento de cabezal debido a la presencia de terrenos fuertemente abrasivos que provocaron un desgaste severo en las herramientas de excavación. Los trabajos de reparación en condiciones hiperbáricas fueron de gran intensidad y con tiempos de

intervención muy dilatados, en numerosas ocasiones de unas 6 semanas seguidas bajo aire comprimido.

En el punto más profundo del cruce fluvial, el personal tuvo que entrar en la cámara de excavación y trabajar, como comentamos anteriormente, con presiones de hasta 4,5 bares. En total 10.920 horas de trabajo se realizaron con aire comprimido a presiones máximas de hasta 4,5. De 2.738 intervenciones 237 fueron a presiones > 3,6 bar.

Se contabilizaron 21 casos de accidentes disbáricos (accidentes de descompresión) todos ellos a presiones < 3,6 bar.

La NATO participó en el plan de emergencias para los supuestos de necesidad de rescate en condiciones extremas hiperbáricas.

El túnel que atravesó el río Yangtze de Nanjing, en China, con un diámetro de 14,96 m y 2.990 m de largo. El punto más profundo del túnel fue de 65 m por debajo del nivel del mar. Debido a las mareas la influencia del nivel del agua del río oscilaba entre +/-1,5 m sobre/debajo del nivel del mar. Los estratos eran principalmente limo y arena fina.

El mantenimiento y la reparación para los trabajos en el cabezal se realizaron bajo aire comprimido a 5,4 bares. Para mantener la estabilidad del terreno se utilizó también bentonita con una mezcla especial de alta densidad y viscosidad. La descompresión con oxígeno fue utilizada con éxito. En total más de 4.000 h de trabajo con aire comprimido y más de 850 intervenciones.

Fueron descritos 3 casos menores de enfermedad descompresiva. Se comprobó que el trabajo con aire comprimido en tuneladoras EPBs es posible con presiones de hasta 6,5 bar. A pesar de que a estas presiones se consideraba la intervención poco eficiente debido a su gran complejidad y coste.



Tuneladora EPBs Herrenknecht con un diámetro de 15, 43 m, en Shangai, China.

En las obras de la construcción de la línea 9 del Metro de Barcelona y del AVE en Girona se produjeron algunos incidentes disbáricos de trabajadores en condiciones hiperbáricas. En ninguno de estos casos estaba implicado el personal sanitario asistencial del IEM.

Algunos de estos casos revistieron una relativa gravedad directamente relacionada a la falta de formación específica en medicina subacuática e hiperbárica del personal sanitario presente en el lugar. A destacar:

- **Caso 1.** Varón de 30 años sin AP de interés ni AMC, submarinista profesional con dilatada experiencia. Durante las operaciones de mantenimiento en zona de trabajo de una tuneladora EBPs, en condiciones hiperbáricas (2 bars), el paciente padece traumatismo con herida inciso contusa hemorrágica a ESD. Sus compañeros alertan y contienen la hemorragia mediante compresión directa y lo trasladan a la cámara principal. El personal sanitario médico entra en la cámara, valora el paciente, C i O, i procede a colocar vendaje compresivo. Una vez finalizado el vendaje da instrucciones al camarista para iniciar la descompresión. El paciente va presentando de forma evolutiva dolor intenso en extremidad superior derecha que el médico no acierta a comprender. De forma larvada se va instaurando una lesión de aspecto inflamatorio que se extiende desde el extremo superior del vendaje hasta el cuello.

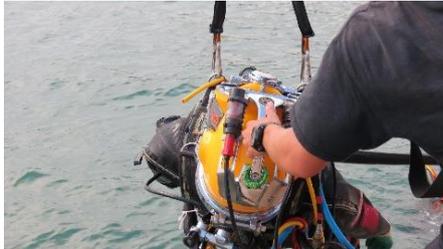
**Diagnóstico:** ENFISEMA SUBCUTÁNIO

Producido por la hiperpresión creada por aire atrapado en la zona de la herida. Al no poder salir por su trayecto natural diseca la piel y provoca la lesión mencionada.

- **Caso 2.** Mujer de 19 años sin AP de interés ni AMC. Buceadora Profesional con bastantes intervenciones previas e inmersiones a pesar de la edad. Durante el proceso de descompresión, controlado por un camarista, y después de estar sometida a condiciones hiperbáricas en el contexto de trabajos de mantenimiento en una tuneladora EPBs presenta sensación disneica, dolor torácico y molestias en el cuello. El diagnóstico inicial realizado por personal sanitario en la tuneladora fue crisis de ansiedad por lo que consideraron oportuno administrar 10mg. Diazepam/VO y derivar al Centro de Atención Primaria (CAP). Ya en el CAP le realizan radiografías de tórax y la diagnostican, según clínica y radiología, de pneumomediastino con enfisema subcutáneo en cuello. Fue posteriormente visitada en el IEM por voluntad propia

**Diagnóstico:** SINDROME DE HIPERPRESIÓN INTRATORÁCICA

El neumomediastino y el enfisema subcutáneo fueron producidos por un neumotórax espontáneo por sobreesfuerzo, en condiciones hiperbáricas, y que en el momento de la descompresión se manifestó por conflicto entre presiones y volúmenes. En el diagnóstico fue tenido en cuenta el mecanismo lesional:



Prácticas de abordaje inicial a un accidentado traumático y disbárico. Foto IEM

### 1.3.6 Factores de riesgo globales del entorno en las tuneladoras

Fueron clasificados los posibles riesgos relacionados con la excavación del túnel con tuneladora a presión de tierras en Sabadell según las siguientes categorías:

#### 1.3.6.1 Riesgos geológicos

##### **Terreno no cohesivo:**

Fluidez de material poco cohesivo, suelto, de seco a húmedo. Este riesgo debía tenerse en cuenta por encima del nivel freático.

##### **Terreno fluyente:**

Fluidez de material poco cohesivo, suelto con gran contenido de agua o afluencia de agua. Este riesgo debía tenerse en cuenta sobre todo en zonas de transición entre el Cuaternario y el Mioceno.

##### **Hundimiento:**

Hundimiento de material cohesivo debido a sobreesfuerzos.

##### **Inestabilidad del frente:**

En caso de producirse una inestabilidad en el frente, podría producirse un fallo a cizallamiento con propagación hasta la superficie que se propaga progresivamente en caso no se consiga que el sostenimiento del frente no funcione.

##### **Obstáculos:**

Existían un número importante de sondeos y pozos dentro de la zona de influencia del túnel.

Se habían identificado pozos, fosas sépticas antiguas y sondeos y/o perforaciones (bien sea de auscultación o geología) dentro de la zona de influencia del túnel.

La identificación preliminar de los pozos y fosas sépticas, se basó en la cartografía existente, y luego se comprobó *in-situ* con topografía y se inspeccionó desde la superficie.

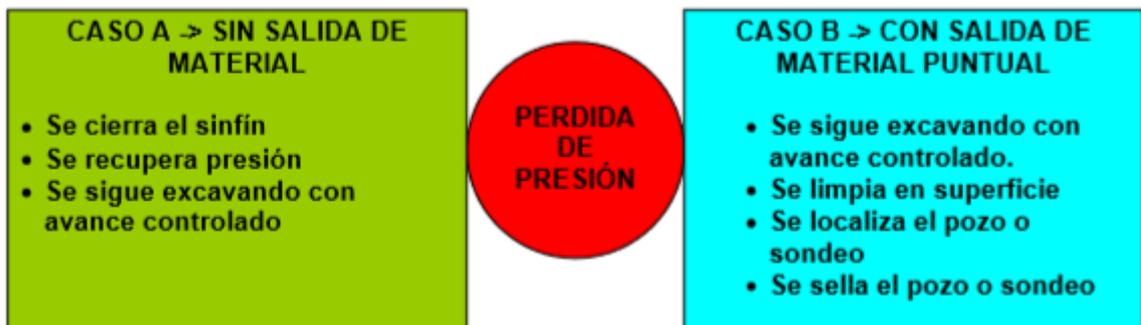
Este trabajo de investigación permitió catalogar pozos y sondeos en una hoja de control, según su estado y posición respecto al túnel (distancia al eje y profundidad según ampolla de influencia).

El objetivo de este inventario era identificar cuales podían representar posibles vías de fuga de espumas, bentonita, aire u otro material producto de la excavación de la tuneladora.

Una vez preparado el inventario de cuanto arriba inspeccionado, se evaluó la mayor o menor necesidad de proceder con los trabajos de sellado o relleno, con el objetivo de prevenir posibles afecciones a la superficie durante la excavación.

En caso no hubieran sido rellenos o sellados y se comunicaran con el frente de excavación, se podría haber producido un corte repentino de la presión de tierras en el frente y/o de la bentonita por coraza y/o del mortero de cola. A consecuencia se podría haber producido un fallo del terreno y/o una perdida y salida de material hasta la superficie.

Diagrama de flujo de cómo actuar en una de estas circunstancias.



### **Interacción:**

En zonas o puntos con características geológico-geotécnicas muy desfavorables, la excavación del primer túnel con el segundo podía tener efectos negativos para la excavación del segundo túnel.

### **Presencia de gas:**

No había constancia de presencia de gas en la totalidad del terreno del proyecto.

### 1.3.6.2 Riesgos atmosféricos

#### **Lluvias:**

Una de las circunstancias más frecuentes era la inundación del túnel en caso de fuertes lluvias. Este riesgo era muy probable durante la construcción del primer tramo de túnel, debido al clima continental de Sabadell, donde los vientos de levante provocan lluvias intensas desde finales de septiembre, justo cuando fue previsto arrancar la tuneladora. También cabía destacar la fuerte pendiente negativa de este primer tramo, que favorecía la entrada de agua en el túnel en caso de falta o fallo del sistema de achique en el pozo.

### 1.3.6.3 Riesgos relacionados con las dovelas del revestimiento

#### **Sobreesfuerzos imprevistos:**

Un defecto de fabricación y/o en fase de acopio, transporte y colocación de las dovelas, podía dar lugar a sobreesfuerzos imprevistos en fase de montaje y empuje, que podían resultar en fisuras y/o desprendimientos de hormigón. También se señaló como posible causa de sobreesfuerzos, el posible incremento de transmisión de par de la rueda de corte a los anillos, debido a la lubricación del escudo con bentonita.

#### **Mortero de cola:**

Un relleno no adecuado del gap entre el anillo y el perfil de la excavación podía dar lugar a sobrepresiones y/o deformaciones anómalas en las dovelas con el riesgo de fisuras y desconches. También una sobrepresión de inyección de mortero podía dar lugar, sobre todo en clave, a daños apreciables en el revestimiento hasta, en situación límite, a su colapso como había pasado en experiencias anteriores.

### 1.3.6.4 Riesgos mecánicos.

#### **Atrapamiento del escudo:**

El atrapamiento del escudo podía producirse por altas cargas inesperadas por parte del terreno y/o fallos de pilotaje en el avance, como por ejemplo una excesiva compresión de un frente granula y fluido con consecuente cierre del terreno en el entorno del escudo. En este caso la maniobra de desbloqueo tenía que ser realizada por personal altamente calificado y, posiblemente, no por el mismo piloto que lo hubiera causado.

#### **Obstrucción y/o atrancamiento de las herramientas de excavación:**

Si el acondicionamiento del terreno no era adecuado, se podía producir el bloqueo de los cortadores, así como un atrancamiento del equipo de sondeo y problemas de extracción del material de excavación por el tornillo sinfín.

### **Daños en el rodamiento principal:**

Todos los componentes mecánicos de la tuneladora estaban sometidos a desgaste y la mayoría de ellos podían ser sustituidos con relativa rapidez. Sin embargo, los daños en el rodamiento principal implicaban mucho más tiempo de reparación (meses). A título de ejemplo, cabe destacar que la simple rotura de un diente o una pieza de un piñón podía causar la rotura de otros piñones de los dientes de la corona del rodamiento como había pasado en experiencias anteriores.

### **Incendio:**

El incendio de una tuneladora es un incidente inusual, que raramente suele ocurrir, pero con efectos devastadores debido al desarrollo de calor, monóxido de carbono, cianhídrico y otros gases tóxicos. Esta circunstancia suele ocurrir por las elevadas temperaturas que pueden desarrollarse en componentes eléctricos o hidráulicos, causando fuego y quemadura de material de revestimiento altamente tóxico. La tuneladora S510 estaba equipada con sensores de gases, de salida de emergencia, extintores y de 2 cámaras de rescate que pueden recibir y alimentar con oxígeno hasta 20 personas cada una por un tiempo máximo de 12 horas.



Cámara de rescate de la tuneladora de Sabadell. Foto IEM.

### **Corte en el suministro eléctrico:**

Los cortes en el suministro de energía suelen ser frecuentes sobre todo en obras de túneles, debido a la presencia de agua y suciedad. Es importante tener grupos electrógenos *in stand-by* que en cualquier momento puedan garantizar el correcto funcionamiento de:

- La cabina de control del piloto y su comunicación con la superficie.
- El sistema de inyección de bentonita en la cámara.
- El cierre de la compuerta del sinfín.
- La ventilación y la iluminación en el túnel

Y todas esas funciones que garanticen en todo momento la estabilidad del frente y del túnel, la protección de la tuneladora y sus instalaciones, así como la seguridad y salud de todos los equipos y personal empleados.

#### **1.3.6.5 Riesgos a terceros**

- **Subsidencias:**

Los riesgos a terceros están relacionados, en primer término, con subsidencias inadmisibles que pueden causar danos apreciables a edificios o estructuras, hasta perjudicar de forma parcial o total su funcionalidad o uso. En el Plan de Auscultación se indican los valores límites considerados para subsidencias e inclinaciones.

- **Impacto medioambiental:**

El contratista es responsable de todos los efectos medioambientales como ruido, vibraciones, polvo y vertido de tierras, que no pueden sobrepasar los límites establecidos por el proyecto y/o por ley.

#### **1.3.7 Riesgos genéricos del trabajo en tuneladoras y acciones correctoras aplicadas de forma estandarizada según la normativa vigente.**

##### **1.3.7.1 Caídas a distinto nivel**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, ya que los operarios durante la jornada realizan desplazamientos por toda la instalación.

**Identificación:**

1. Utilización de escaleras manuales cerca del borde de plataformas o pasarelas.
2. Trabajos de mantenimiento en altura de los elementos de corte del escudo.
3. Desplazamientos entre niveles a través de la estructura.
4. Toma de nivel para la colocación de dovelas y fijación de dovelas en altura.

**Medidas preventivas:**

- Montaje y mantenimiento barandillas en huecos de plataformas interiores.
- En los trabajos con escaleras manuales cerca del borde de plataformas o pasarelas el operario deberá utilizar el arnés de seguridad anclado a un punto seguro de la estructura de la tuneladora.
- Durante los trabajos de mantenimiento en instalaciones en altura, el operario sujetará el arnés a elemento fijo de la estructura.
- Durante el mantenimiento del escudo se utilizarán pasarelas y/o andamios dotados de plataformas de 60 cm, barandillas de 90 cm y escalerillas de comunicación.
- En las operaciones de eslingado y deslingado en plataformas sin protección perimetral el personal deberá utilizar el arnés de seguridad anclado a un punto seguro de la estructura de la tuneladora.
- Los desplazamientos entre niveles por la estructura de la tuneladora se realizarán por las escaleras destinadas a tal fin. Está prohibido trepar por la estructura de la tuneladora.
- El personal encargado de realizar la toma de nivel para la correcta colocación de las dovelas y la fijación de las mismas deberá hacer uso del arnés de seguridad con su correspondiente marcado CE anclado a un punto seguro de la estructura de la tuneladora siempre que sea necesario sobrepasar o subir a las barandillas rígidas de protección de la tuneladora para realizar dicha operación. Se utilizará un gancho de apertura rápida que permita su sujeción a elementos gruesos de la estructura.
- El personal que realice trabajos en altura sin protección colectiva deberá hacer uso del arnés de seguridad con su correspondiente marcado CE anclado a un punto seguro de la estructura de la tuneladora.

### 1.3.7.2 Caídas al mismo nivel

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, ya que los operarios durante la jornada realizan desplazamientos por toda la instalación.

#### Identificación:

1. Existencia de materiales y objetos en zonas de paso y de trabajo.
2. Existencia de elementos (tuberías, cables, etc.) a nivel de suelo.
3. Acumulación de grasas y aceites en zonas de paso y de trabajo.
4. Limpieza de las dovelas con aire comprimido y retirada de tablonces de madera de entre las dovelas.
5. Falta de iluminación.
5. Desplazamientos entre niveles a través de la estructura.
6. Toma de nivel para la colocación de dovelas y fijación de dovelas.

#### Medidas preventivas:

- Mantener correctamente acopiados los materiales y herramientas de trabajo en la zona del taller.
- Señalizar con bandas negras y amarillas aquellos desniveles y/o escalones de las diferentes zonas de paso y de trabajo.
- Señalizar con bandas negras y amarillas aquellos elementos que discurren a nivel de suelo o bien cubrir los elementos con una pasarela tipo *trámex* para permitir el paso seguro a través de ellos.
- Mantener limpias las zonas de paso y de trabajo con el fin de evitar la acumulación de grasas y aceites (cabeza de la tuneladora, nivel 3 en carro R-2 zona skid hidráulico principal, etc.).
- Mantener los niveles de iluminación adecuados en las zonas de paso.
- La limpieza de las dovelas deberá realizarse desde la pasarela mediante una boquilla de aire comprimido más larga para evitar que el personal salte las barandillas del nivel 1 y se coloque encima de la pila de dovelas. Los tablonces deberán retirarse con una barra para hacerlos caer a la zona de la vía. Antes de que el erector se ponga en marcha el operador del polipasto de manipulación de dovelas deberá hacer sonar el pitido para que el personal evacue la zona de la vía.

- Cuando solo queden una o dos dovelas apiladas la operación de limpieza y eliminación de tablonos podrá realizarse desde la zona de la vía central. Antes de que el erector se ponga en marcha el operador del polipasto de manipulación de dovelas deberá hacer sonar el pitado para que el personal evacue la zona de la vía.
- Los desplazamientos por la estructura de la tuneladora se realizarán por las escaleras destinadas a tal fin. Está prohibido trepar por la estructura de la tuneladora.
- Proteger con cadenillas el desembarco de materiales en la zona de acopio de aceites cuando no se estén realizando operaciones de carga de descarga de materiales de la tuneladora.
- El personal encargado de realizar la toma de nivel para la correcta colocación de las dovelas deberá adoptar posturas seguras, con los dos pies abiertos y correctamente apoyados en la dovela. Si se estima oportuno se utilizará el arnés de seguridad anclado a un punto fijo de la estructura.

#### 1.3.7.3 **Caídas de objetos por desplome o derrumbamiento**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo ya que los operarios durante la jornada laboral realizan desplazamientos frecuentes por toda la instalación.

##### **Identificación:**

1. Rotura de elementos de los polipastos.
2. De materiales acopiados debidos a movimientos de la tuneladora.

##### **Medidas preventivas:**

- Realizar mantenimiento preventivo de los elementos que componen los diferentes polipastos (poleas, elementos de sujeción, motor, etc.).
- Proteger con barandilla rígida, listón superior, intermedio y rodapié los acopios de materiales cerca del borde de plataformas de trabajo o zonas de paso.
- No realizar acopios peligrosos: pilas de material demasiado elevadas.
- Se utilizarán soportes para el almacenaje de tuberías y raíles.

#### 1.3.7.4 **Caídas de objetos en manipulación (materiales, herramientas)**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, y se consideran especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo siguientes: operador erector, especialista eléctrico-electrónico, especialista mecánico-hidráulico, eléctrico de mantenimiento, mecánico de mantenimiento, ayudante colocación dovelas, operador pupitre dovelas, operador polipasto dovelas, ayudante montaje vía, ayudante tuberías y soportes, ayudante montaje cinta, soldador, trabajador hiperbárico.

##### **Identificación:**

1. Herramientas manuales en manipulación.
2. Desplome de la carga suspendida por polipastos.
3. Desplome de la dovela manipulada (elevación y transporte) por erector.

##### **Medidas preventivas:**

- Realizar mantenimiento preventivo de los elementos de sujeción de los diferentes polipastos.
- Los ganchos estarán dotados de pestillo de seguridad, en prevención del riesgo de desprendimientos de la carga.
- Utilización y mantenimiento adecuado del pestillo de seguridad.
- Se prohíbe expresamente sobrepasar la carga máxima admitida por el fabricante de los polipastos.
- Se realizará una inspección semanal del estado de seguridad de las cadenas de izado de materiales.
- El personal que manipule el polipasto no deberá mantenerse bajo la carga suspendida.
- El encargado de manejar el polipasto advertirá al personal que se encuentre en las inmediaciones del inicio de la manipulación de cargas mediante la señal acústica.
- El personal que realice trabajos en altura con herramientas manuales deberá utilizarlas atadas a un cinturón portaherramientas con el fin de evitar que se caigan sobre otro trabajador.
- El personal encargado de la manipulación de dovelas nunca se mantendrá debajo de la carga suspendida.

### 1.3.7.5 **Caída de objetos desprendidos (materiales no manipulados)**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, y se consideran especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo siguientes: operador erector, especialista eléctrico-electrónico, especialista mecánico-hidráulico, eléctrico de mantenimiento, mecánico de mantenimiento, ayudante colocación dovelas, operador pupitre dovelas, operador polipasto dovelas, ayudante montaje vía, ayudante tuberías y soportes, ayudante montaje cinta, soldador, trabajador hiperbárico.

#### **Identificación:**

1. Desplome de la carga suspendida por polipasto.
2. Herramientas manuales en manipulación.
3. Materiales acopiados cerca del borde de plataformas o pasarelas.
4. Desplome de las dovelas suspendidas por erector.

#### **Medidas preventivas:**

- No mantenerse bajo la carga suspendida por los polipastos.
- No dejar cargas suspendidas por polipastos sin la supervisión por parte del personal responsable.
- Evacuar la zona de elevación y transporte de dovelas cuando estas estén suspendidas por el erector. El operador que maneje el polipasto deberá advertir mediante la señal acústica del polipasto el inicio de la operación y asegurarse de que no haya personal ni en la zona de recorrido de la dovela.
- Durante la operación de manipulación de dovela con erector para la colocación de la misma el personal no deberá pasar ni mantenerse debajo del recorrido de la dovela.
- No pasar bajo el personal que realice trabajos en altura con herramientas manuales.
- Los acopios que se realicen cerca del borde de las diferentes plataformas o pasarelas deberán protegerse con barandilla rígida, listón superior, barra intermedia y rodapié.

### 1.3.7.6 **Pisadas sobre objetos**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, y se considera especialmente expuesto a los riesgos identificados a los puestos de trabajo del soldador.

**Identificación:**

1. Existencia de retales metálicos, objetos punzantes, etc. en zonas de paso y trabajo.

**Medidas preventivas:**

- Mantener en buen estado de orden y limpieza todas las zonas de la tuneladora donde se puedan acumular objetos y/o elementos cortantes y/o punzantes.
- Uso obligatorio de botas de seguridad con plantilla reforzada para todo el personal de la tuneladora.

**1.3.7.7 Golpes contra objetos inmóviles**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo debido a los desplazamientos frecuentes por la instalación.

**Identificación:**

1. Salientes (vigas de la estructura, válvulas, etc.) en zonas de paso.
2. Zonas de paso muy estrechas.
3. Zonas de paso con poca altura.
4. Falta de iluminación.
5. Cargas suspendidas.

**Medidas preventivas:**

- Señalizar y proteger los cantos vivos de la estructura de la tuneladora (.
- Señalizar los salientes de los diferentes depósitos bentonita, agua, etc., salientes en zonas de paso.
- Señalizar el paso bajo tuberías.
- Mantener la iluminación suficiente en aquellas zonas de paso y de trabajo con el fin de evitar golpes con elementos situados a una altura no superior a 1,70 m así como en aquellos que su anchura no supere los 60 cm.
- El uso obligatorio del casco de seguridad para todo el personal de la tuneladora.

- No dejar cargas suspendidas por polipastos sin la supervisión por parte del personal responsable.

#### 1.3.7.8 **Golpes con elementos móviles de máquinas**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, y se consideran especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo que manipulen los diferentes polipastos.

##### **Identificación:**

1. Con estructura móvil del polipasto.
2. Con elementos móviles de los diferentes polipastos: cadenas, poleas, ganchos, etc.

##### **Medidas preventivas:**

- Mantenerse fuera del radio de acción de los diferentes polipastos de la tuneladora mientras estén siendo utilizados.
- Mantener resguardados los elementos móviles de los polipastos: ganchos, cadenas...
- Mantenerlos los ganchos de los polipastos a una altura suficiente para evitar golpes, en caso de ser imposible resguardarlos.
- Uso obligatorio del casco de seguridad en los trabajos de manipulación de cargas con polipastos.

#### 1.3.7.9 **Golpes con objetos o herramientas**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo en los cuales se utilicen herramientas manuales para el desarrollo de su trabajo.

##### **Identificación:**

1. Con herramientas manuales utilizadas en varios puestos de trabajo.

##### **Medidas preventivas:**

- Utilizar las herramientas manuales para el fin con el cual fueron diseñadas.

- Guardar en el lugar destinado a tal fin las herramientas manuales una vez hayan sido utilizadas.
- Uso obligatorio de guantes de piel flor en todos los trabajos con herramientas manuales.
- Uso obligatorio del cinturón portaherramientas por parte del personal que utilice herramientas manuales para el desarrollo de su trabajo.

#### 1.3.7.10 **Proyección de fragmentos o partículas**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo, y se consideran especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo siguientes: especialista mecánico-hidráulico, mecánico de mantenimiento, operador pupitre dovelas, operador polipasto dovelas, ayudante montaje vía, ayudante tuberías y soportes, operador inyección de mortero, ayudante inyección, ayudante montaje cinta, soldador, trabajador hiperbárico.

#### **Identificación:**

1. En operaciones de lijado, taladrado, esmerilado con radial, etc.
2. En operaciones de manipulación de mortero.
3. En operaciones de soldadura.
4. Limpieza con pistola de aire comprimido de la parte superior de las dovelas.

#### **Medidas preventivas:**

- Utilización de gafas de protección en las operaciones de lijado, taladrado, esmerilado con radial, etc.
- Utilización de gafas o pantallas de protección en las operaciones en las cuales se manipule mortero.
- En los trabajos de soldadura se usará pantalla protectora con cristales absorbentes.
- Para picar la escoria o cepillar la soldadura, proteger los ojos con gafas de seguridad o con pantalla transparente.
- Uso obligatorio del mandil y polainas de soldador en los trabajos de soldadura.

- Uso obligatorio de gafas de protección en las operaciones de limpieza con pistola de aire comprimido de la parte superior de las dovelas antes de ser manipuladas por el erector.
- Antes de la realización de cualquier tipo de trabajo que pueda dar lugar a la proyección de fragmentos o partículas el operario deberá cerciorarse de que no hay nadie en las inmediaciones, tanto a su mismo nivel como por debajo de él si éste desarrolla el trabajo en altura.
- El personal que utilice la radial deberá asegurarse antes de la utilización de ésta que lleva el resguardo adecuado y que éste funciona correctamente.

#### 1.3.7.11 **Atrapamiento por o entre objetos**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo y están especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo siguientes: ayudante montaje cinta, ayudante inyección gravilla, operador inyección de mortero, ayudante colocación dovelas, así como todos aquellos que manipulen cargas con polipastos como los trabajadores hiperbáricos.

##### **Identificación:**

1. En rodamientos de la cinta transportadora.
2. En ruedas giratorias de tuberías de achique y en entrada de agua.
3. Entre cargas suspendidas por polipastos y estructura rígida de la tuneladora.
4. Entre parte móvil en cabeza y parte fija del carro R-0.
5. Al tomar el nivel en la colocación de dovelas.

##### **Medidas preventivas:**

- Carenar todos los rodamientos de la cinta transportadora que se encuentren a menos de 2,5 m respecto del nivel del suelo y/o aquellos que aun estándolo se pudiera acceder desde una altura superior y se convirtiera por lo tanto en un elemento susceptible de atrapamiento.
- Instalar paro de emergencia en el punto de carga de la cinta.

- Carenar las ruedas giratorias de las tuberías de achique y entrada de agua ya que son accesibles desde el nivel 1.
- Tras las operaciones de mantenimiento instalar los carenados, como en su estado original, en las partes móviles de todos los equipos.
- Cuando no haya protección colectiva (barandillas rígidas) para protegerse, el personal deberá mantenerse alejado de la zona de carga y descarga con el fin de quedar resguardo frente a un deslizamiento intempestivo de la carga.
- Prohibición de permanencia de operarios en las zonas de batido de cargas durante las operaciones de izado.
- Advertir mediante señal acústica el inicio de la maniobra de movimiento de cabeza (cuando se manipula el erector) y el carro R-0 que se mantiene fijo. Asegurarse de que no hay presencia de personal en esta zona (entre escaleras de acceso a la cabeza móviles y la plataforma que se mantiene fija).
- El personal que manipule el erector para la colocación de dovelas deberá detener la maniobra cuando otro operario tome el nivel para la correcta colocación de las dovelas.
- El personal encargado de tomar el nivel para la correcta colocación de las dovelas no se apoyará entre la última dovela colocada y la que está en movimiento.

#### 1.3.7.12 **Atrapamiento por vuelco de máquinas o vehículos**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

#### 1.3.7.13 **Sobreesfuerzos**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo que manipulen cargas pesadas y en especial al ayudante de colocación de dovelas.

#### **Identificación:**

1. Manejo de materiales pesados con polipastos manuales.
2. En la toma de nivel para la colocación de dovelas.

3. En la fijación de dovelas con atornilladora de aire comprimido.
4. Manejo de materiales pesados: bidones de aceite, tuberías, raíles, etc.

**Medidas preventivas:**

- Las operaciones que requieran la sustentación o manejo de cargas de más de 25 kg deberán ser realizadas por más de un operario.
- Para la operación de toma de nivel para la correcta colocación de las dovelas se deberá utilizar un útil más largo del que se usa actualmente con el fin de evitar la adopción de posturas forzadas y que el personal sobrepase el espacio delimitado por las barandillas rígidas de la tuneladora.
- Con el fin de evitar sobreesfuerzos la fijación de dovelas deberá ser realizada por dos o varios operarios alternativamente debido al peso de la propia herramienta unido a la adopción de posturas forzadas para realizar la operación.

**1.3.7.14 Exposición a temperaturas ambientales extremas**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo en caso de fallo en el sistema de renovación de aire.

**Identificación:**

1. En condiciones normales de utilización
2. En caso de fallo en el sistema de renovación de aire.

**Medidas preventivas:**

- Realizar mantenimiento preventivo en la instalación de renovación de aire.
- En el caso de fallo en el sistema de renovación de aire se seguirán las instrucciones marcadas en el Plan de Emergencia.
- Realizar la medición del nivel de temperatura ambiental.

**1.3.7.15 Contactos térmicos**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

### 1.3.7.16 Contactos eléctricos

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo y están especialmente expuestos a los riesgos identificados los puestos de trabajo siguientes: eléctrico de mantenimiento, especialista eléctrico-electrónico

#### **Identificación:**

1. Cuadros eléctricos y armarios accesibles.
2. Bornes del grupo de soldeo sin aislamiento.
3. No existencia de tierras en rejillas de protección de los transformadores y en grupo electrógeno.

#### **Medidas preventivas:**

- Los cuadros, armarios y transformadores eléctricos deberán mantenerse cerrados bajo llave para evitar que sean manipulados.
- Prohibir la manipulación de cuadros, armarios, transformadores, etc. por parte de personal NO autorizado.
- Colocar señalización "Peligro equipos bajo tensión" en la entrada a la zona de los armarios en nivel 3 del carro R-3.
- Señalizar todos los cuadros, bandejas, armarios y transformadores eléctricos mediante señalización homologada de riesgo eléctrico.
- Señalizar con señal de "Peligro alta tensión" y proteger con aislante aquellas bandejas por las cuales discurren cables de alta tensión.
- Cuando se realicen trabajos en aquellas líneas por las cuales pasan cables en tensión dichos cables deberán descargarse antes de empezar los trabajos de reparación y/o mantenimiento.
- Poner a tierra toda la instalación eléctrica de la tuneladora (incluidas las rejillas de protección de los trafos y el grupo electrógeno).
- No realizar operaciones de corte o soldadura cerca de bandejas con cables en tensión. Descargar la línea cuando sea necesario.
- El personal de eléctrico deberá conocer las cinco reglas de oro de la electricidad:

- 1ª Regla: abrir con corte visible todas las fuentes de tensión mediante interruptores y seccionadores que aseguren la imposibilidad de su cierre intempestivo.
- 2ª Regla: enclavamiento o bloqueo, si es posible, de los aparatos de corte y señalización en el mando de éstos.
- 3ª Regla: reconocimiento de la ausencia de tensión.
- 4ª Regla: puesta a tierra y en cortocircuito de todas las posibles fuentes de tensión.
- 5ª Regla: colocar las señales de seguridad adecuadas, delimitando la zona de trabajo.

#### **1.3.7.17 Inhalación o ingestión de sustancias nocivas**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo cualquiera que sea el factor de riesgo identificado.

##### **Identificación:**

1. Humos procedentes de la locomotora de suministro.
2. Fallo en el sistema de renovación de aire.
3. En caso de incendio.

##### **Medidas preventivas:**

- El personal deberá mantenerse lo más alejado posible de la locomotora, así como hacer uso de mascarillas en el caso de que la atmósfera fuera irrespirable.
- Una vez la locomotora de suministro llegue a la zona de descarga el conductor deberá parar el motor.
- En caso de que se produzca un fallo en el sistema de renovación de aire se seguirán las instrucciones marcadas en el Plan de Emergencia definido para los trabajos en el interior del túnel.

- En caso de incendio deberán seguirse las instrucciones marcadas en el Plan de Emergencia definido para los trabajos en el interior del túnel.
- El personal que manipule aceites o grasas deberá utilizar guantes contra agentes químicos.
- El personal que manipule aceites y/o grasas, deberá limpiarse, con agua y jabón, las manos, cara, etc. antes de comer o de fumar.

#### 1.3.7.18 **Contacto con sustancias causticas y/o corrosivas**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

#### 1.3.7.19 **Exposición a radiaciones**

Este riesgo es común a todo el personal que se encuentre cerca del lugar donde se realizan trabajos de soldadura y en especial al puesto de trabajo del soldador.

##### **Identificación:**

1. Trabajos de soldadura.

##### **Medidas preventivas:**

- En los trabajos de soldadura se usará pantalla protectora con cristales absorbentes.
- Comprobar que la pantalla o careta no tiene rendijas que dejen pasar la luz y que el cristal (o filtro) contra radiaciones es adecuado al tipo y amperaje de la soldadura.
- Para picar la escoria o cepillar la soldadura, proteger los ojos con gafas de seguridad o con pantalla transparente.
- Los ayudantes del soldador u otros trabajadores próximos también están expuestos a los mismos riesgos. Deben llevar gafas con cristales absorbentes y con protección lateral o bien se deberá limitar el área de soldadura mediante las cortinas rojas de material ignífugo.

- Los rayos UV pueden producir quemaduras y ampollas cuando actúan durante mucho tiempo sobre la piel desnuda. No trabajar nunca con las mangas remangadas.
- Los EPI's mínimos a utilizar son: pantalla de protección de cara y ojos, guantes de cuero de manga larga, mandil de cuero, calzado de seguridad.
- Imprescindible que sea aislante cuando se suelde sobre elementos metálicos: casco de seguridad si el trabajo lo requiere, arnés de seguridad cuando se suelde en altura. Debe ser protegido para evitar que las chispas lo quemen.

#### 1.3.7.20 Explosiones

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo de la tuneladora y está especialmente expuesto el puesto de trabajo de soldador.

##### **Identificación:**

1. Botellas de gases licuados.

##### **Medidas preventivas:**

- El suministro y transporte interno de obra de las botellas de gases licuados se efectuará según las siguientes condiciones:
  - Estarán las válvulas de corte protegidas por la correspondiente caperuza protectora.
  - No se mezclarán botellas de gases distintos.
  - Se transportarán sobre bateas enjauladas en posición vertical y atadas, para evitar vuelcos durante el transporte.
  - Los puntos 1, 2 y 3 se cumplirán tanto para bombonas o botellas llenas como para bombonas vacías.
- El traslado y ubicación para uso de las botellas de gases licuados se efectuará mediante carros porta botellas de seguridad.
- Los sopletes para soldadura mediante gases licuados estarán dotados de válvulas antirretroceso de la llama, en prevención del riesgo de explosión.
- Se prohíbe la utilización de botellas de gases licuados en posición inclinada.
- Se prohíbe el abandono antes o después de su utilización de las botellas de gases licuados.
- Las botellas de gases licuados se acopiarán separados (oxígeno, acetileno), con distinción expresa de lugares de almacenamiento para las ya agotadas y las llenas.

- Se controlarán las posibles fugas de las mangueras de suministro de gases licuados, por inmersión de las mangueras bajo presión en el interior de un recipiente lleno de agua.
- El número de botellas de gases licuados se limitará al estrictamente necesario.
- No acopiar botellas de gases licuados en las vías de evacuación.

#### 1.3.7.21 **Incendios**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo de la tuneladora.

##### **Identificación:**

1. En el sistema eléctrico (nivel 3, carro R-3).
2. En la cabina de control.
3. En la línea de alimentación de alta tensión.
4. En la locomotora de suministro.
5. Trabajos de soldadura, esmerilado con radial.

##### **Medidas preventivas:**

- En el caso de incendio en alguno de los puntos identificados anteriormente (sistema eléctrico, cabina de control, línea de alimentación de alta tensión y locomotora de suministro) se deberá proceder según indica el Plan de Emergencia constituido para los trabajos en el túnel.
- Cuando se realicen trabajos de esmerilado con radial o soldadura el operario deberá cerciorarse de que no existe ninguna fuente inflamable cerca de él. Los trabajos se realizarán con un extintor a mano para poder ser utilizado en caso de incendio.

#### 1.3.7.22 **Accidentes causados por seres vivos (ratas, etc.)**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

### 1.3.7.23 **Atropellos, golpes y choques con vehículos**

Este riesgo es común a todos los puestos de trabajo de la tuneladora.

#### **Identificación:**

1. Con la locomotora de suministro que discurre en la parte central de la tuneladora.

#### **Medidas preventivas:**

- Señalizar las escaleras de acceso desde el nivel 1 hacia la parte central por donde discurre la locomotora con señales de “Peligro paso de vehículo”.
- Prohibir el acceso de personal a través de las escaleras cuando la locomotora esté circulando por las vías.
- Suspender los trabajos y evacuar la zona central por donde discurren las vías siempre que la locomotora circule por las mismas.
- Mantenimiento de la señal luminosa de la locomotora, cuando la locomotora llegue a la zona de descarga el conductor hará sonar la señal acústica.
- Durante el montaje de las vías, cerciorarse de que la locomotora de suministro no discurre por las vías centrales.

### 1.3.7.24 **Accidentes de tránsito (“*in itinere*”)**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

### 1.3.7.25 **Causas naturales (en horario laboral)**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

### 1.3.7.26 **Enfermedades causadas por agentes químicos**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

### 1.3.7.27 **Enfermedades causadas por agentes físicos (ruido, vibraciones, etc.)**

Este riesgo puede ser común a todos los puestos de trabajo de la tuneladora dependiendo de los niveles de ruido que se den durante el desarrollo del trabajo. Inicialmente están especialmente expuestos los puestos de trabajo siguientes: ayudante colocación dovelas y el operador polipasto dovelas.

**Identificación:**

1. Fijación de dovelas con atornilladora de aire comprimido.
2. Limpieza de dovelas con pistola de aire comprimido.
3. Perforación del túnel

**Medidas preventivas:**

- El personal encargado de la fijación de dovelas con atornilladora de aire comprimido deberá utilizar guantes contra vibraciones y protectores auditivos.
- El personal encargado de la limpieza de dovelas antes de la manipulación de éstas por el erector deberá utilizar protectores auditivos.
- Realización de mediciones de niveles de ruido cuando se pueda realizar la medición en condiciones normales de trabajo.

**1.3.7.28 Enfermedades causadas por agentes biológicos**

No se prevén en la presente Evaluación Inicial de Riesgos.

**1.3.7.29 Accidentes causados por el entorno hiperbárico objeto del presente estudio**

Se tratan extensamente en el apartado 2 de la tesis: Entorno fisopatológico de los trabajadores a presión o hiperbáricos

**1.3.7.30 Resumen esquemático de los riesgos más destacados objeto del presente estudio**

<b>Riesgo</b>	<b>Acciones correctoras</b>
Caídas a distintos niveles	Montaje de barandillas
	Utilizar el arnés de seguridad en trabajos en altura y en dovelas
	Montaje de andamios
	Utilizar las escaleras

Caídas al mismo nivel	Mantenimiento correcto del material.
	Señalización.
	Limpieza
	Iluminación
	Utilizar las escaleras habilitadas
	Adopción de posturas seguras (2 pies abiertos).
	Utilización del arnés si es necesario.
Caídas de objetos	Mantenimiento.
	Protección
	Limitación de material
	Uso de soportes
	Mantenimiento de elementos de sujeción.
	Pestillos de seguridad
	No estar bajo la carga
	Uso de cinturón portaherramientas
Pisadas de objetos	Orden
	Limpieza
	Uso de botas de seguridad
Golpes contra objetos inmóviles	Señalización
	Iluminación
	Uso de casco
	No dejar cargas suspendidas sin supervisión
Golpes contra elementos móviles	Mantenerse fuera de su alcance
	Uso del casco
Golpes con objetos o herramientas	Buen uso de las herramientas
	Guardarlas en su sitio
	Uso de guantes
	Uso de cinturón portaherramientas
Proyección de fragmentos o partículas	Gafas de protección
	Pantalla protectora
	Mandil y polainas en soldaduras
	Resguardos en radiales
Atrapamientos por objetos	Carenar cinta transportadora hasta 2,5m altura

	Parada de emergencia
	Mantenerse alejado de zonas de descarga.
	Señal acústica
Sobreesfuerzos	Más de 2 operarios en cargas de más de 25 Kg.
	Evitar posturas forzadas
Temperaturas ambientales extremas	Mantener la instalación de aire
	Medir la temperatura
Contactos eléctricos	Cuadros eléctricos cerrados
	Instalaciones con puesta a tierra
	No manipular instalaciones el personal no autorizado
	5 reglas de oro
Inhalación de sustancias nocivas	Parar la locomotora a la llegada
	Renovación de aire
	Si falla el sistema seguir el plan de emergencia
	Utilizar guantes en caso de manipulación de grasas o aceites.
Exposición a radiaciones en soldadura	Usar pantalla
	Guantes de manga larga
	Ropa de protección
	Calzado de seguridad
Explosiones	Seguir normas con las botellas de gases licuados
	Válvulas antirretornos en equipos de soldadura
	Limitar el número de botellas
	Control de fugas y de sus posiciones
Incendio	Plan de emergencia
	En soldadura y trabajo con radial necesario tener un extintor y evitar la proximidad de fuentes inflamables
Atropello por la locomotora del tren	Señalización
	No acceder por las escaleras cuando la locomotora circula
	Señal luminosa y acústico a la llegada
	No trabajar en vías si circula la locomotora
Ruidos y vibraciones	Uso de guantes anti-vibraciones y protectores auditivos
	Ediciones de ruido cuando sea necesario

### **1.3.8 Dificultades y riesgo específicos, o incrementados, en tuneladoras EPBs o hiperbáricas.**

La utilización de tuneladoras EPBs ha aportado nuevos métodos y tipologías de trabajo que comportan la aparición de nuevos riesgos para los servicios de emergencias. Riesgos que deberían conocer con detalle y disponer de procedimientos de intervención específicos en caso de incidentes.

En las obras de construcción de la línea suburbana de los FGC en Sabadell no se superaron los 20 metros de profundidad (equivalente a <3 bars absolutos) y la presión relativa media de trabajo de los buceadores fue de 1,1 bars.

Por debajo de una profundidad de 40 metros (lo que equivale a 5 bares), los trabajadores hiperbáricos entran en una zona en la que ya no es eficaz realizar intervenciones con aire comprimido en condiciones convencionales. En la construcción de los túneles bajo el río Westerschelde, con un largo de 6,6 kilómetros que pasa entre Ellewoutsdijk y Terneuzen en los países bajos, los buceadores de la empresa alemana Nordseetaucher GmbH llegaron a trabajar con presiones superiores a los 5 bares.

Durante varias décadas, una serie de métodos y procedimientos han sido probados y aplicados en el comercio internacional de buceo *offshore* a gran presión. Métodos que también se han utilizado en la construcción de túneles a presiones superiores a 5 bares. El uso de mezclas de gases: oxígeno y varios gases inertes en proporciones diferentes a la del aire, permiten que los buceadores trabajen durante días y semanas bajo condiciones presurizadas (método de saturación).

En el contexto del presente estudio podemos sintetizar las dificultades y riesgos específicos, o incrementados, en tuneladoras EPBs o hiperbáricas, en:

- Los derivados de la hiperbaria especificados más adelante en los apartados de fisiopatología del buceo propios de los entornos hiperbáricos.
- Consecuencias diferenciadas del sobreesfuerzo físico en un entorno hiperbárico, con todos los peligros intrínsecos que comporta, incrementando el riesgo de posibles accidentes disbáricos entre el personal.
- Temperatura ambiente elevada. La zona de excavación donde los trabajadores hiperbáricos realizaban sus funciones sufría unos incrementos de temperatura elevadísimos por rozamiento de las herramientas de corte de la corona de la tuneladora con el terreno.

- Humedad ambiente elevada. La inyección de bentonita para estabilizar el frente de excavación y de agua para refrescar la zona de trabajo comportaba un incremento muy significativo de la humedad.
- Gran contaminación sonora. El funcionamiento continuo de los compresores de aire, que garantizaban el mantenimiento de las presiones en la zona de excavación y de trabajo de los buceadores, generaba unos niveles de contaminación sonora que se debían de paliar con medidas correctoras específicas.
- Trabajos en altura (10 -12 m. aprox. dependiendo del modelo de tuneladora).
- Manipulación de herramientas pesadas que precisan de instalaciones de soporte.
- Peligro de desprendimientos por inestabilidad del terreno.
- Terreno pantanoso con peligro de hundimiento e inundación.
- Accesos complicados: antecámara y cámara hiperbárica previas a la zona de trabajo.
- Dificultad de acceso y de intervención para los equipos de socorro



Buceador en la zona de trabajo en condiciones de temperatura y humedad extremas. Foto IEM

## 1.4 Descripción de los trabajadores de tuneladoras.

### 1.4.1 Sin presión

Trabajadores de la obra, entrenados en la manipulación de las herramientas necesarias para el mantenimiento de la corona de la tuneladora, en óptimas condiciones físicas y psíquicas.

Como cualquier trabajador del sector de la construcción cuentan con la formación necesaria en prevención de riesgos laborales y con las revisiones médicas preceptivas, según lo que se determina en la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales y en la Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción.

#### **1.4.2 A presión**

Se trata de buceadores profesionales en activo.

Las tuneladoras EPBs, cuando trabajan a presión, requieren de personal acreditado, cualificado y formado adecuadamente para trabajos hiperbáricos en ciclos controlados de compresión, trabajo y descompresión. Al estar en vigor la Orden del Ministerio de Fomento de 14 Octubre 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas (BOE Núm. 280, de 22 de Noviembre del 1.997), se requería la acreditación de buzo profesional para poder trabajar en condiciones hiperbáricas. Hoy por hoy, y en el momento de redactar este trabajo, a pesar de ser ésta una legislación diseñada para actividades de buceo, tanto deportivo como profesional, es el único referente legal de seguridad para trabajos en condiciones de presiones superiores a la atmosférica en España.

### **1.5 Perfil de salud previo de los buceadores objeto del estudio**

Todo buceador, para el ejercicio de su profesión precisan obtener un certificado médico oficial de aptitud que debe renovarse cada año.

En la mencionada Orden del Ministerio de Fomento de 14 Octubre 1997, se determina, entre otras, la obligatoriedad de los reconocimientos médicos, tanto deportivos como profesionales, así como la titulación específica exigida a los médicos para poder expedir los certificados de aptitud en el buceo. En concreto en el Capítulo IV, Artículo 25. De los reconocimientos médicos de las personas que se sometan a un ambiente hiperbárico, se afirma lo siguiente:

- Toda persona que se someta a un ambiente hiperbárico, deberá realizar previamente un examen médico especializado.
- Este examen o posteriores reconocimientos deben ser realizados por médicos que posean título, especialidad, diploma o certificado, relacionado con actividades subacuáticas, emitido por un organismo oficial.

- Los reconocimientos periódicos serán obligatorios para acceder a cualquier título o certificado que habilite para someterse a un medio hiperbárico, aparte del examen inicial (este debe figurar en un certificado médico oficial).
- Se repetirán anualmente en el caso de los buceadores y buzos profesionales. Este reconocimiento debe figurar en su libreta de actividades subacuáticas.

Así mismo, en el Artículo 20, sobre el reconocimiento médico, de la Resolución de 25 de enero de 2012, de la Dirección General de Empleo, por la que se registra y publica el II Convenio colectivo de buceo profesional y medios hiperbáricos. (BOE 37 de 13-02-2012) se especifica:

*“Los trabajadores afectados por el presente Convenio Colectivo pasarán una revisión médica específica adecuada a su puesto de trabajo según normativa vigente. La empresa será responsable de la gestión del reconocimiento médico de sus trabajadores.”*

Estas exigencias legales condicionaron positivamente el estado físico de los buceadores objeto del estudio.

El único marco legal de ámbito estatal en España donde se especifican condiciones de aptitud que han de tener los buceadores es la Orden de 25 de abril de 1973 (BOE 173, 20 de julio) en la que se aprueba el reglamento para el ejercicio de actividades subacuáticas. La única excepción la encontramos en Real Decreto 1696/2007, de 14 de diciembre, (BOE n. 313 de 31/12/2007). por el que se regulan los reconocimientos médicos de embarque marítimo y que afecta solo a los buzos embarcados.

En esta orden de 1973 se regula, entre otros el tipo de reconocimiento médico, las exploraciones complementarias mínimas y los criterios de exclusión. Una regulación claramente obsoleta que condiciona que, en la actualidad, cada centro y/o profesional haya adaptado el contenido de sus revisiones médicas de buceo a la realidad actual. Esta discrecionalidad ha condicionado, en algunos casos desgraciadamente, una falta de rigor y de ética con revisiones “en grupo”, sin exploración física mínima por aparatos, etc. Revisiones médicas con objetivos estricta y únicamente económicos y de mercado, desoyendo las recomendaciones mínimas publicadas en medicina hiperbárica, bajando precios de forma temeraria. Afortunadamente, en algún caso, administraciones públicas, como en el caso de la Generalitat de Catalunya, ha realizado inspecciones comportando el cierre y/o desautorización de algún centro.

En España, a nivel global del estado, el único protocolo oficial aprobado, adecuado a la realidad actual en medicina, y hecho público de forma libre, fue el del Departamento Médico de la Federación Española de Actividades Subacuáticas (FEDAS) en el 2004

### **1.5.1 Protocolo de valoración médica de aptitud para trabajadores en ambiente hiperbárico (revisiones médicas de buceo)**

#### **Anamnesis e historia laboral (reconocimientos previos y periódicos)**

La anamnesis está dirigida a:

#### **1. Determinar el perfil del buceador y grado de intensidad de su actividad en condiciones hiperbáricas:**

- Titulación inicial y fecha de obtención
- Máxima titulación y fecha de obtención.
- Número de inmersiones al año los últimos 3 años
- Número de inmersiones al año los últimos 3 años a más de 30 metros de profundidad (4 bars)
- Máxima profundidad los últimos 12 meses
- Otras actividades hiperbáricas

#### **2. Descartar antecedentes personales de patologías que en condiciones hiperbáricas puedan condicionar la aptitud de los buceadores:**

- Consumo crónico de alcohol y drogas o sustancias de abuso.
- Afecciones pulmonares

Neumonía, neumotórax espontáneos o secundarios, bronquitis crónica, asma, tuberculosis, EPOC, bronquiectasias, bullas enfisematosas, pleuropatías, insuficiencia respiratoria restrictiva, obstructiva o mixtas etc.

- Afecciones cardiovasculares

HTA no controlada, Insuficiencia vascular arterial periférica, cardiomiopatías, enfermedad isquémica, trastornos del ritmo, etc.

- Afecciones neurológicas o neuroquirúrgicas

TCE, pérdida de conocimiento, focalidades, amnesia post traumática, convulsiones, crisis vertiginosas, etc.

- Afecciones psiquiátricas

Reacciones de adaptación, trastornos de ansiedad, fobias (claustrofobia y/o agorafobia), episodios psicóticos aislados, etc.

- Afecciones digestivas

Enfermedad intestinal inflamatoria, enfermedad crónica hepática, patología de la vesícula biliar y pancreatitis, dispepsia, esofagitis de reflujo y úlcera péptica con sangrado, episodios recurrentes de dolor abdominal, etc.

- Afecciones otorrinolaringológicas

Otitis media crónica, síndrome laberíntico, cirugía de la oreja con colocación de prótesis, enfermedad de Ménière, tubos nasales y paranasales obstruidos, dudas sobre la movilidad de membrana timpánica, etc.

- Afecciones del Sistema endocrino

Diabetes, enfermedades tiroideas, etc.

- Afecciones hematológicas

Poliglobulias, alteraciones de la coagulación, etc.

- Afecciones oftalmológicas

Glaucoma, desprendimientos de retina, etc.

- Afecciones dermatológicas

Hipersensibilización a materiales y equipos de buceo, dermatosis que se agraven en contacto con el medio subacuático, enfermedades exfoliativas severas

- Afecciones odontológicas

Falta de integridad de caninos, incisivos y/o premolares que dificulten la utilización de la boquilla del regulador.

- Afecciones disbáricas previas.
  - Factores que predispongan a la ED

Descartar *shunts* derecha-izquierda: foramen oval, etc.

A destacar, como etiología más frecuente, la Persistencia de Foramen Oval, que en condiciones normobáricas no presenta clínica en la inmensa mayoría de personas, pero en condiciones hiperbáricas, dependiendo del tamaño y de la actividad realizada, pueden dar clínica más o menos importante.

No se practica de rutina, y no se considera obligatorio, en el examen previo de aptitud ni en los reconocimientos periódicos.

- El tiempo mínimo de rehabilitación después de un episodio de ED:

### **3. Efectos de la medicación actual**

Los informes anecdóticos de accidentes de buceo tienen un valor limitado para determinar si es seguro bucear mientras se toma un medicamento en particular; generalmente hay demasiados factores físicos y fisiológicos involucrados para permitir el aislamiento de una sola variable.

Es teóricamente posible que ciertos fármacos puedan potenciarse o aumentar sus efectos por el efecto narcótico del nitrógeno. Un buzo debe considerar esta posibilidad si planea bucear a más de 24 metros (3,4 bars) mientras toma un medicamento que advierta contra el consumo de alcohol o la utilización de maquinaria pesada. Aparte de esta preocupación teórica, según publica DAN, no se sospecha que la mayoría de los medicamentos incurran en riesgos biológicos específicos debido a la inmersión, la presión u otras mezclas respiratorias.

La disminución de la aptitud física no es algo raro entre las personas que están siendo tratadas por problemas médicos. El buceo puede ser extenuante en determinadas circunstancias. Los buceadores siempre deben tener la capacidad física suficiente para luchar contra una corriente, realizar una larga natación en superficie o ayudar a un compañero en caso de emergencia.

Además de las implicaciones de la afección subyacente, es importante considerar si un buceador ha experimentado algún efecto secundario de un medicamento, cuánto tiempo lo ha estado tomando y qué otras drogas están tomando. Antes de bucear, mientras toma un medicamento en particular, la persona debe tener experiencia con él en tierra. Un buceador que experimente cualquier efecto secundario que pueda causar distracción o disminución de la conciencia bajo el agua, no debe bucear.

Además de estas consideraciones generales, hay algunas preguntas específicas y puntos de discusión relevantes para determinados tipos de medicamentos. Preguntas y consideraciones que deben abordarse durante la evaluación del médico y en la autoevaluación del buceador:

Determinados tratamientos farmacológicos pueden condicionar la aptitud de un buceador para el ejercicio de su actividad profesional. El timolol, por ejemplo, puede disminuir la frecuencia cardíaca, lo que en teoría podría poner a un pequeño porcentaje de buzos en un riesgo mayor de perder el conocimiento bajo el agua; la acetazolamida puede causar una sensación de hormigueo en manos y pies que podría confundirse con síntomas de la ED.

#### **4. Exploración física**

- Auscultación cardiorrespiratoria
- Valoración musculoesquelética

Amputaciones, atrofias, parálisis, artropatías crónicas, secuelas postquirúrgicas o traumáticas, dolor espalda, etc.

- Valoración ORL

Otoscopia antes y después de Valsalva, detectar problemas para compensar

- Valoración neurológica

Pares craneales, reflejos, Romberg y Babinski-Weill, diferencias de la respuesta motora entre lado izquierdo y derecho, etc.

- Valoración bucodental

Caries u otras alteraciones.

- Obesidad

Mayor riesgo de enfermedad descompresiva y enfermedades coexistentes como diabetes, hipertensión, apnea del sueño, etc.

- Minusvalías

Necesitarán de evaluación detallada e individual

## 5. Exploraciones complementarias

- Analítica previa:

Glucosa, creatinina, colesterol total, HDL, LDL y VLDL, GGT, GPT, GOT, ácido úrico, triglicéridos, urea, bilirrubina total, proteínas totales, fosfatasa alcalina, actividad de protrombina en %. Normalmente el paciente dispone de una analítica de control.

En caso contrario, o si la historia clínica / anamnesis específica o exploración lo justifican se solicita una de específica.

- Radiología tórax:

Previa y periódica si la historia clínica / anamnesis específica o exploración lo justifican.

Si la intensidad en la actividad hiperbárica del paciente (>50 inmersiones / año a profundidades superiores a los 30 metros) y/o se sospecha osteonecrosis disbárica están indicadas radiografías de control y/o RMN de grandes articulaciones.

- ECG / Monotorización ECG

Valorar posibles alteraciones del ritmo.

Prueba de esfuerzo o similares según paciente

- Espirometría / Pulsioximetría / co-oximetría.

Soporte a la exploración respiratoria

- Las pruebas que determine el especialista / experto acreditado en medicina subacuática e hiperbárica en función de cada caso.

En algunas comunidades como en Catalunya, Galicia, Asturias y Aragón es obligatorio el test de compresión hiperbárica y tolerancia al oxígeno hiperbárico en las pruebas de aptitud inicial de los buceadores profesionales (Anexo 2).

En resumen, podemos asegurar que los trabajadores objeto del presente estudio han sufrido un proceso de control sanitario específico que nos permite afirmar que presentan un estado de salud óptimo previo a las intervenciones hiperbáricas.

## **1.6 Antecedentes y experiencias en tuneladoras EPBs en la Península Ibérica**

La utilización de tuneladoras EPBs en obras de gran envergadura en nuestro territorio introdujo en la normalidad estas nuevas tecnologías y en consecuencia nuevos retos para los servicios de emergencias. En concreto, se emplearon en las obras del metro de Madrid en el 2002 y sobre todo, a partir del 2005, las de la Línea 9 del Metro de Barcelona, con 46 kilómetros de túneles desde Santa Coloma de Gramanet y Badalona hasta el aeropuerto del Prat de Llobregat, y que pasa por Barcelona y l'Hospitalet de Llobregat.

Estas obras de gran envergadura y riesgo en nuestro territorio introdujeron también nuevos retos para los servicios de emergencias.

Posteriormente, del 2010 al 2014, las obras en Sabadell de las líneas de Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya impulsaron nuevamente esta tecnología y nuevos avances en procedimientos de emergencias en este ámbito. La mejora, concreción y adecuación a la realidad de los planes de emergencias específicos en este ámbito fue evidente.

En el período comprendido entre el 2005 y el 2014 han operado más de 18 tuneladoras EPBs en el estado.

Las principales empresas constructoras de obra civil del país –Fomento de Construcciones y Contratas SA, Ferrovial & Agromán SA, Obrascón Huarte Lain SA, Copisa Constructora Pirenaica SA, Scrinser SA., OHL, COMSA Emte, Sacyr o Dragados–están o han estado implicadas en este tipo de construcciones constituyendo UTEs para llevar a cabo las obras.

La dirección de las mencionadas obras y las autoridades públicas, entre otras medidas de seguridad, objetivaron desde el inicio la necesidad de poder contar con la presencia de un Servicio Preventivo de Asistencia Sanitaria Inmediata de Emergencias capaz de resolver con eficacia y eficiencia un accidente en este complejo ámbito hasta la llegada de los servicios de emergencias, ya que éstos pueden demorarse bastante por la dificultad de acceder a la zona de trabajo desde la entrada del túnel.

El personal sanitario y de rescate presente debería tener un perfil claramente prehospitalario con experiencia y/o formación específica en medicina hiperbárica y de

emergencias debidamente acreditadas. Desgraciadamente, en algún caso este criterio mínimo de rigurosidad profesional no se ha cumplido

En la tuneladora EPBs utilizada en Porto (Portugal), a consecuencia de la extremada heterogeneidad de la tierra, se instaló un dispositivo especial de ayuda: se compensaba automáticamente la inestabilidad y heterogeneidad del terreno, aparte de con la sobrepresión en el área de la corona de la cámara de trabajo, con la inyección de una mezcla de bentonita presurizada. Este sistema funcionó con éxito y se instaló también en las tuneladoras EPBs utilizadas para construcción de una extensión de las líneas de metro en Atenas (Grecia), en las de las líneas 9 y 10 del metro de Barcelona y en las de la UTE Túnel Sabadell.

En Porto, algunos equipos de gestión de la dirección de la obra rehuían a menudo la inspección sistemática y el mantenimiento de herramientas de excavación, por desconocimiento, o por la dificultad que entrañan estas acciones. La falta de mantenimiento, en particular de las herramientas de excavación, podía causar problemas graves en las tuneladoras EPBs. Como consecuencia de esta falta de mantenimiento, en varias ocasiones, las herramientas fueron completamente desgastadas hasta la estructura de la cabeza de corte. Este incidente comportaba una reparación de larga duración que paralizaba la obra con elevadísimos costes derivados del paro y de la propia reparación de la corona.

Este mismo incidente se produjo en la línea 9 del metro de Barcelona a la altura de Zona Franca comportando también una muy dilatada, compleja y costosa parada de las obras.

En el proyecto metro de Porto, el desgaste de las herramientas de excavación consumió, en algunos momentos, hasta un disco por metro de túnel, debido a la alta abrasión del granito.

En otros casos falló la presurización debido a pérdida de aire a través de la tierra inestable que envolvía el escudo de la tuneladora. El problema fue resuelto bombeando suelo artificial, con bentonita, que penetró, bajo presión, en el terreno y lo estabilizó.

Como se comentó con anterioridad, durante las intervenciones de control y mantenimiento mencionadas, para poder acceder a la cámara de trabajo para su inspección o reparación, debe ser proporcionado aire comprimido, es decir se precisa crear un entorno hiperbárico. Esta acción requiere conocimientos y experiencia especiales con técnicas de aire comprimido y de especialistas en trabajos hiperbáricos, que no están disponibles en todas las empresas constructoras.

## **2. ENTORNO FISIOPATOLÓGICO DE LOS TRABAJADORES A PRESIÓN O HIPERBÁRICOS**

Hoy por hoy existe todavía un gran desconocimiento de la fisiopatología del buceo y/o hiperbárica entre los profesionales de la medicina en España.

Desconocimiento consecuencia de la práctica no existencia de este tema en los programas formativos oficiales de las universidades españolas.

De forma bastante reciente algunos tratados de Medicina Interna mencionan de forma muy superficial la patología disbárica y su tratamiento.

El entorno fisiopatológico de los trabajadores a presión, o hiperbáricos, es aún más desconocido. El único referente posible es el del buceo con escafandra autónoma

La práctica del buceo con escafandra autónoma comporta, por definición, una alteración de las condiciones físicas, químicas y fisiológicas de la persona que lo practica. Del conocimiento de las mismas y del respeto a la normativa depende la seguridad en la práctica del mismo, tanto en el entorno deportivo como en el profesional.

En el proceso de formación de un buzo profesional, como en este caso, la seguridad y la prevención de riesgos es una constante en todos los apartados. Podemos afirmar que es una de las profesiones donde está más interiorizada la prevención de riesgos laborales y el respeto a las normas de seguridad.

Dado que estos cambios de adaptación al medio, y los posibles accidentes relacionados, son poco conocidos fuera del entorno específico del buceo se presenta a continuación un resumen dirigido de la fisiopatología del buceo en relación con este estudio.

### **2.1 Fundamentos básicos del buceo**

Como cualquier masa, el cuerpo de un buceador se ve sujeto a los diversos efectos físicos de la inmersión; éstos conllevan a su vez una serie de efectos y respuestas fisiológicas importantes a considerar, pues son ellas las que dictan los límites de la seguridad.

### 2.1.1 Fundamentos físicos

Los tres pilares de la física del buceo son:

- El principio de Arquímedes
- La presión
- Y las leyes de los gases, principalmente la ley de Boyle-Mariotte.

El primero explica el fenómeno de flotabilidad, el segundo la variación de la presión con la profundidad y el último el comportamiento de los gases al variar la presión.

#### 2.1.1.1 El Principio de Arquímedes

Se aplica al buzo como un todo. El cuerpo del buzo (y su equipo) presentan una masa total y desplazan un volumen de agua equivalente al volumen del cuerpo sumergido. El buzo está sometido entonces a un par de fuerzas opuestas: por un lado, el efecto de la gravedad sobre su masa (el peso del buzo y su equipo), por otro lado, la fuerza de flotación ejercida por el agua, equivalente a la masa de agua del volumen desplazado por el buzo.

El principio de Arquímedes tiene incidencia sobre la fisiología del buceo que nos interesa poco en este estudio. Su aplicación es lo que permite al buzo mantener una flotabilidad neutra, descender o ascender. La correcta conservación, mantenimiento y utilización del chaleco de buceo es determinante.

#### 2.1.1.2 Presión

La presión absoluta a la que se ve sometido un cuerpo en inmersión es la suma de la presión atmosférica (debida al peso de la columna de aire) y la presión hidrostática (debida al peso de la columna de agua). La presión atmosférica normal a nivel del mar es de 1 atmósfera. La presión ejercida por una columna de 10 m de agua de mar equivale más o menos 1 atmósfera de presión. Luego, para cálculos rápidos y sencillos, asumimos que por cada 10 metros de profundidad, la presión aumenta 1 atmósfera ó 1 bar, pues  $1,013 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$ .

El principio de Pascal determina que la presión ejercida sobre un fluido se transmite uniformemente por todo el fluido, de manera que la presión atmosférica se transmite, y se suma en cada plano a una misma profundidad, a la presión hidrostática. De igual forma, en cada tejido blando del buzo se transmite la presión total, haciendo que la presión interna de las cavidades sea igual a la externa.

### 2.1.1.3 Leyes de los gases

#### Ley de Boyle - Mariotte

Expresa el equilibrio de un gas a temperatura constante. Durante la inmersión la variación de temperatura del aire es mínima y por lo tanto esta ley es especialmente práctica para entender la relación entre presión y volumen. Básicamente, ésta se ve enunciada en la siguiente igualdad:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

La presión es inversamente proporcional al volumen de un gas: al aumentar la presión sobre una masa de gas, el volumen de este disminuye proporcionalmente.

Así, una masa constante de aire que en superficie (1 bar) ocupa un litro, verá su volumen reducido a la mitad (1/2 L) al someterse a una presión de 2 bar (-10 m), a un tercio (1/3 L) a 3 bar (-20 m) y así sucesivamente. En el caso que nos ocupa sería a un quinto (1/5 L) a 5 bar (-40 m aprox.). De igual manera, en relación inversa, un litro de aire a 2 bar (-10m), doblará su volumen a 2 L al subir a superficie. Si no conseguimos vaciar el exceso de aire en ese pequeño intervalo de -10m hasta superficie, la estructura anatómica de los pulmones sufrirá un accidente de sobre presión gravísimo.

#### Ley de Dalton

La ley de Dalton explica que la presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones que ejercerían cada uno de los gases componentes ocupando a ellos solos el volumen total.

Esta ley también se conoce como la ley de las presiones parciales, pues implica que la presión parcial de un gas en una mezcla de gases sometida a una presión X, es directamente proporcional a la proporción en que ese gas está presente en la mezcla.

Esto quiere decir, que si en una mezcla de gases un ingrediente representa el 20% del volumen de la mezcla a una presión P, el ingrediente que nos interesa presenta una presión parcial de 0,2 P.

En el aire normal la composición es, aproximadamente, de un 21% Oxígeno y 78% Nitrógeno, con un 1% de otros gases (fundamentalmente argón). Redondeando, la presión parcial de cada uno de sus componentes será:

Pr. Total	Pr. parcial O <sub>2</sub>	Pr. parcial N <sub>2</sub>	Profundidad equivalente
1 bar	0,2 bar	0,8 bar	Pr. Superficie = Pr. Atmosférica
2 bar	0,4 bar	1,6 bar-10 m = 1 bar	Pr. Hidrostática + 1 bar Pr. Atmosférica
3 bar	0,6 bar	2,4 bar-20 m = 2 bar	Pr. Hidrostática + 1 bar Pr. Atmosférica
4 bar	0,8 bar	3,2 bar-30 m = 3 bar	Pr. Hidrostática + 1 bar Pr. Atmosférica
5 bar	1,0 bar	4,0 bar-40 m = 4 bar	Pr. Hidrostática + 1 bar Pr. Atmosférica
(P-1)*-10 m = (P-1) bar P. hidrostática + 1 bar P. Atmosférica			

### Ley de Henry de disolución de los gases

La ley de Henry explica que a una temperatura dada y en condición de saturación, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión ejercida por el gas sobre la superficie del líquido.

Esto comporta que el buzo está sometido a un estado de hiperoxia e hipersolubilidad nitrogenica proporcional a la profundidad alcanzada.

A bajas temperaturas la difusión de nitrógeno es mayor.

### Ley de difusión de Graham

El fenómeno de difusión entre dos gases, es decir, la velocidad a la que se mezclan es explicada por esta ley. A igual temperatura y presión, la velocidad de difusión de un gas de moléculas "ligeras" se difunde más rápido que uno de moléculas "pesadas".

Los dos principales gases en el aire, el nitrógeno (N) y el oxígeno (O) se encuentran en las formas moleculares N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. La masa molar del nitrógeno es de 28, mientras que la del oxígeno es de 32. Por lo tanto la velocidad de difusión del nitrógeno es mayor que la del oxígeno.

### Ley de difusión de Fick

Describe la tasa de transferencia de un gas a través de una membrana (o capa de tejido). Ésta es proporcional a la superficie expuesta así como a la diferencia entre las presiones de sus dos fases e inversamente proporcional al espesor de la

membrana/tejido. Además, la velocidad de difusión es proporcional a la constante de difusión (particular al tipo de tejido y de gas que interviene).

## **2.1.2 Fundamentos fisiológicos y riesgos propios en el buceo autónomo**

Las anteriores reglas físicas tienen una gran influencia en un buzo en inmersión y conllevan una serie de efectos mecánicos y bioquímicos a considerar.

### **2.1.2.1 Efectos de la presión**

#### **Cambios volumétricos por efecto de la presión**

A medida que un buzo desciende, el volumen de aire disminuye debido a la presión. Los compartimentos en "caja" deben ser suficientemente elásticos para permitir la compresión del volumen o deben ser compensados activamente por el buzo. Los senos nasales, paranasales y frontales, así como los canales auditivos (trompas de Eustaquio) deben compensarse mediante la maniobra de Valsalva o con un breve ejercicio de espiración forzada cerrando nariz y boca. El buzo con escafandra autónoma, al tener una fuente de aire autónoma y equilibrada a la presión ambiente reemplaza el volumen pulmonar con un mayor aporte de aire a medida que respira en el descenso; pero debe tener especial cuidado durante el ascenso.

En buceo con escafandra autónoma los accidentes ligados a este efecto son barotraumatismos mecánicos. Los más frecuentes son las hemorragias en los senos faciales y la rotura de tímpano. Los más graves, los barotraumatismos pulmonares: por sobrepresión. Los pulmones llegan al límite de dilatación y los alvéolos se lesionan generando un neumotórax (el aire escapa a la cavidad torácica), un enfisema mediastínico dado que el aire escapa a la cavidad del corazón, un enfisema subcutáneo al avanzar este aire disecando tejidos siguiendo la pared de la tráquea al cuello, tórax, etc., una embolia gaseosa cuando el aire escapa por las venas y arterias y un edema pulmonar agudo al romperse vasos alveolares e inundar los pulmones de sangre. Este cuadro clínico recibe el nombre de Síndrome de Hiperpresión Intratorácica o Sobre Expansión Pulmonar o Sobrepresión Pulmonar.

#### **Factores de disolución y difusión**

Como comentamos anteriormente a nivel del mar (1 bar), las presiones parciales de  $N_2$  y de  $O_2$  serán respectivamente, redondeadas, de 0,8 bar y 0,2 bar. Normalmente los tejidos del cuerpo están en saturación para el  $N_2$  (es decir que la presión del  $N_2$  en los tejidos es de 0,8 bar). Pero no sucede igual con el oxígeno. El  $O_2$  respirado es

transportado internamente por la hemoglobina presente en la sangre, aunque una parte importante circula bajo una forma disuelta. Además, el oxígeno es consumido en el metabolismo celular, que a cambio produce dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que es transportado por vía venosa (por la hemoglobina y bajo forma disuelta) hacia los pulmones.

El  $\text{N}_2$  atmosférico, o en su defecto el helio, se comporta como un gas inerte: no se metaboliza ni combina con ningún sistema biológico y queda disuelto, aunque inactivo, en sangre. Durante la inmersión aumenta considerablemente la presión parcial de nitrógeno, generando un desequilibrio entre la presión parcial y la presión tisular. Siguiendo las leyes de disolución y difusión de los gases, los tejidos se encontrarán en fase de subsaturación y empezarán a absorber  $\text{N}_2$  para equilibrarse nuevamente. Este proceso genera una sobresaturación de  $\text{N}_2$  de los tejidos que el buceador tendrá que eliminar de forma reglada en el proceso de la ascensión. Si no se realiza convenientemente esta “desaturación” se producirá un fenómeno denominado accidente de descompresión que será comentado más adelante.

#### 2.1.2.2 Efectos bioquímicos

##### Toxicidad de los gases

- **Hiperoxia**

A partir de tensiones tisulares superiores a los 0,5 bar, el oxígeno empieza a tomar un carácter tóxico que se consolida completamente cuando su presión tisular alcanza 1,7 bar. Bajo esas presiones parciales el  $\text{O}_2$  se disocia en radicales libres (peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  y radicales hidroxilo (OH) que inhiben la función celular a nivel de la membrana.

Este efecto sobre la membrana celular afecta especialmente el sistema nervioso (la membrana celular de las neuronas y su delicado equilibrio de electrolitos y sustancias mensajeras son la clave de la transmisión de los impulsos nerviosos). Por lo tanto, aunque todos los tejidos se ven afectados por igual, su efecto neurotóxico es el que reviste mayor gravedad. El sistema nervioso regula y controla la mayoría de las funciones vitales.

La intoxicación por oxígeno produce convulsiones, pérdida de conocimiento y puede llevar al consiguiente ahogamiento del buzo. El riesgo de hiperoxia dicta los límites de seguridad del buceo autónomo con aire.

- **Narcosis de nitrógeno:**

Aunque el nitrógeno y otros gases inertes son químicamente estables, bajo concentraciones elevadas (léase presiones parciales y tensiones tisulares) producen efectos reversibles sobre el sistema nervioso. Estos efectos son, en general, similares a los debidos a la intoxicación por alcohol o a las sustancias narcóticas y es por esto que reciben el nombre de "narcosis". Cuando la presión tisular del N<sub>2</sub> es mayor o igual a 4bar, los efectos empiezan a manifestarse; pero es muy variable de un individuo a otro.

Los buzos autónomos con aire están expuestos a este tipo de efecto, pudiéndose dar casos muy por encima de los -30 m (3,2 bar de presión parcial de N<sub>2</sub>), dependiendo del estado general del buzo.

Los síntomas típicos son la euforia, despreocupación, alteración de la capacidad de raciocinio y de concentración, pérdida de memoria y desorientación.

De manera análoga a los efectos del alcohol, el cambio en la presión parcial del nitrógeno en los tejidos altera las propiedades de permeabilidad de las membranas celulares, siendo particularmente afectadas las células del tejido nervioso que dependen de dicho equilibrio para la transmisión de las señales. La hipótesis de la concentración mínima alveolar (Meyer-Overton) establece que la narcosis aparece cuando el gas penetra la capa lipídica de las membranas de las células nerviosas del cerebro; interfiriendo con la transmisión de las señales entre las neuronas.

Esta alteración perceptual y cognitiva de quien padece una narcosis de este tipo es fácil de reconocer en sus inicios para un buzo profesional y poder evitar su evolución hacia un comportamiento ilógico en un ambiente de riesgo como lo es el buceo autónomo. La narcosis por nitrógeno es fácilmente reversible: los efectos desaparecen al disminuir la presión (ascendiendo a menores profundidades o a presión atmosférica), técnica habitual y de todos conocida en el mundo del buceo profesional con escafandra.

La Narcosis por Nitrógeno es junto con los baro-traumatismos y los accidentes por descompresión, riesgos típicos del ascenso, uno de los factores de riesgo más importantes en el buceo autónomo. El aspecto más peligroso de esta condición es la pérdida de objetividad, la incapacidad de actuar racionalmente, la desorientación y la mala coordinación. En sus formas más graves, el buzo empieza a sentirse invulnerable y a incumplir las normas de seguridad básicas del buceo.

Aunque cada individuo puede ser más o menos vulnerable a los síntomas de la narcosis, las pruebas demuestran que todo buzo se ve invariablemente afectado por la narcosis de nitrógeno. La diferencia entre los buzos en la manera y el grado en que la narcosis les afecta es debida en parte a factores de aclimatación, entrenamiento y técnicas respiratorias.

Aun así no existe ningún método confiable para predecir la severidad de los efectos de narcosis en cada individuo, estos pueden variar en cada inmersión (incluso en un mismo día). Sus efectos dependen de múltiples factores, con variaciones importantes entre individuos.

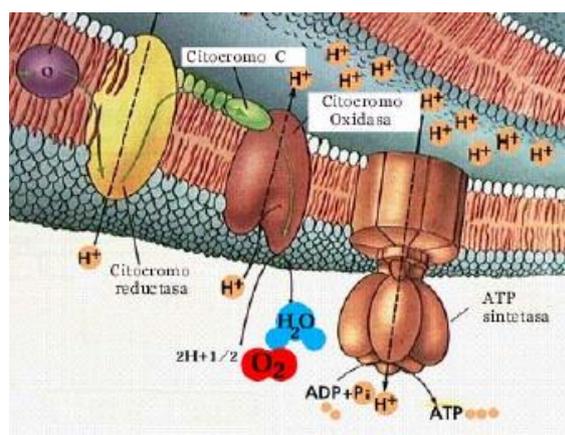
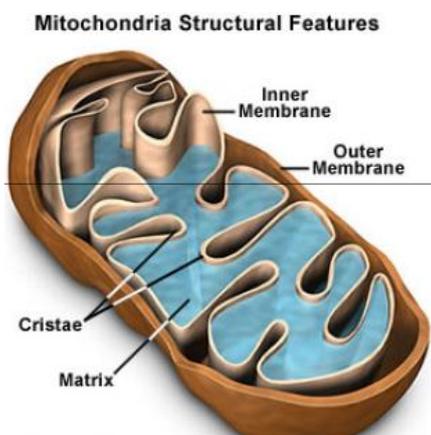
- **Intoxicación por CO**

El CO es un gas inodoro, incoloro e insípido, pero altamente tóxico cuando se respira a proporciones del 0.2%.

Este gas aparece en las combustiones incompletas. Su toxicidad se explica entre otros por su unión a la Hb formando la carboxiHb (COHb), lo que la hace inútil para el transporte de oxígeno, produciendo una situación de asfisia celular

## Mecanismos de acción en la intoxicación por CO

### Unión reversible a la Citocromo Oxidasa impidiendo la respiración celular y la síntesis de



Concentracion estimada de CO	%Carboxihemoglobina
0.005% (50ppm) Humo de tabaco	10
0.01% (100ppm)	20
0.02% (200ppm)	30
0.03-0.05% (300–500ppm)	40-50
.08-0.12% (800-1200ppm)	60-70
0.19%- (1900 ppm)	80

Tabla de equivalencia entre concentraciones de CO y el % COHb

Es difícil de detectar. Puede presentar síntomas similares a la gripe, pero también es posible que una persona esté intoxicada y no presente ningún síntoma. Una intoxicación ligera por CO puede provocar:

- Confusión mental, lo que puede llevar a una toma de decisiones deficiente y a poner en riesgo a la persona expuesta, buceador o grupo control.
- Privación de oxígeno al corazón y al cerebro. La intoxicación por CO (ICO) aumenta considerablemente los riesgos para la salud a largo plazo.

Basta una sola intoxicación grave por CO para tener casi el doble de riesgo de sufrir muerte prematura. La exposición permanente a la intoxicación por CO puede provocar daño cardíaco y cerebral a largo plazo.

COHb	SEVERIDAD	SIGNOS / SINTOMAS
< 10%	NULA	Asintomático
10 – 20 %	NULA / LEVE	Asintomático o cefalea
20 – 30 %	MODERADA	Mareo, nauseas, vómitos, vértigos, disnea
30 – 40 %	MODERADA / SEVERA	Visión borrosa
40 – 50 %	SEVERA	Confusión, síncope, taquicardia, taquipnea
> 50 %	FATAL	Coma, disfunción cardio-pulmonar, muerte

Tabla de la clínica de la ICO según el % de COHb

- **Intoxicación por anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)**

Incoloro, inodoro e insípido a bajas concentraciones siendo oloroso y de sabor ácido en concentraciones altas.

En el buceo podemos encontrar dos formas de intoxicación por este gas:

- Intoxicación externa que se produce cuando la mezcla que respira el buceador está contaminada por este gas. Esta situación aparece, sobre todo, en el buceo, durante el uso de equipos de circuito cerrado o semicerrado cuando el absorbente de este gas no funciona correctamente. En el entorno de las tuneladoras hiperbáricas la intoxicación puede sobrevenir por fallo de los mecanismos preventivos de renovación y control del aire.
- Intoxicación interna: se produce por desequilibrios entre la producción interna de CO<sub>2</sub> y su eliminación vía respiratoria. Entre los factores que pueden explicar este desequilibrio destacan; ejercicio físico elevado, aumento del espacio muerto del equipo respiratorio, aumento en la densidad de los gases respirados, aumento de las resistencias respiratorias y acortamiento de la fase espiratoria de la respiración.

## **2.2 Síndromes relacionados con la práctica del buceo y de actividades en entornos hiperbáricos en general**

Disbarismo es un término genérico que hace referencia a cualquier síndrome provocado por la exposición a disminuciones o incremento de la presión barométrica en relación con las presiones de los tejidos y las cavidades del cuerpo.

Según esta definición, los accidentes relacionados con la práctica del buceo los podemos dividir, según su etiopatogenia, en 2 grandes bloques:

### **Accidentes NO disbáricos del buceo**

Propios del entorno acuático, pero sin relación con los cambios de presión provocados por la profundidad. De entre los No disbáricos nos centraremos en:

- La asfixia mecánica en general.
- El ahogamiento o asfixia por sumersión en particular
- La hipotermia.
- El Edema Agudo de Pulmón de los buceadores y nadadores de alta competición

### **Accidentes disbáricos del buceo (ADB).**

Derivados de los cambios producidos por la presión ambiental.

En adelante repasaremos los más significativos relacionados con el presente estudio.

En concreto:

- Enfermedad Descompresiva (ED)
- Síndrome de Hiperpresión Intratorácica (SHI)
- Edema Agudo de Pulmón no cardiogénico por inmersión (EAPI)

Nos centraremos principalmente, por su frecuencia, especificidad y gravedad, en la enfermedad descompresiva (ED) y en el síndrome de hiperpresión intratorácica (SHI), también denominado sobrepresión pulmonar.

## 2.2.1 Accidentes NO disbáricos

### 2.2.1.1 Asfixia mecánica. Generalidades

Asfixia es una palabra derivada del griego asphyxía, que a su vez derivaba de sphyzo “hago un latido”. Asfixiar, término que aparece por primera vez en el Diccionario de la Academia de 1882, es entonces no dejar que lata el corazón.

La definición actual de asfixia es suspensión o dificultad en la respiración.

A la asfixia se puede llegar por diferentes vías, en las que el nexo de unión es la aparición de un daño tisular por falta de oxígeno en todos los casos: hipoxia; en algunos, además, puede añadirse el efecto dañino de la acidosis respiratoria.

Las asfixias las podemos clasificar de una forma simple en:

<b>Naturales</b>	De origen externo
	De origen interno
<b>Violentas</b>	Tóxicas
	Mecánicas

Es evidente que una descripción de las asfixias naturales escapa, en un principio, al objetivo de este estudio.

En el grupo de las Asfixias Violentas encontramos las que son de origen tóxico y las de origen mecánico. Las de origen tóxico, al estar relacionadas claramente con la accidentabilidad en la práctica de las actividades hiperbáricas serán objeto del presente estudio en el apartado de disbáricas.

## Clasificación y concepto de Asfixia Violenta Mecánica

Entendemos por asfixia violenta mecánica a la «Muerte o lesiones de origen físico, producidas por la interferencia en el aporte de oxígeno al organismo en su distribución».

Las diferentes vías fisiopatológicas que pueden conducir a la muerte –o causar lesiones- en los casos de Asfixia Mecánica, justifica que, previamente a proponer un concepto general, se exponga una clasificación de sus variedades.

Una clasificación que puede hacerse, como ampliación de la mostrada anteriormente para las asfixias en general, aparece en la tabla que sigue:

Las asfixias violentas mecánicas a su vez las podemos clasificar en:

Cervicales	Ahorcadura
	Estrangulación
Extracervicales	Neurológicas
	Por compromiso muscular
	Por alteraciones del trayecto del aire
	Oxiprivas
	Mixtas

Nos centraremos en las que podrían estar relacionadas con este estudio:

Por alteraciones del trayecto del aire	Oclusión de orificios	
	Afectación de la vía	Por sólidos
		Por líquidos
Oxiprivas	Por confinamiento	
	Por gases inertes	

La hipoxia, en general, podía establecerse:

1. por defecto de oxígeno
2. por defecto de hemoglobina
3. por defecto de distribución
4. por defecto de utilización

En el caso de las asfixias mecánicas, únicamente vamos a encontrar la primera y tercera posibilidad, sea de forma aislada o combinada.

Las asfixias mecánicas extracervicales producidas por alteraciones del trayecto del aire, tradicionalmente se han clasificado en:

1. Oclusión de orificios respiratorios.
2. Afectación de las vías aéreas.

El trastorno en la vía aérea puede estar producido, a su vez, por sólidos o por líquidos y puede consistir en una auténtica oclusión, como sucede en los casos de enclavamiento de un cuerpo extraño, o de un estímulo mecánico o térmico que provoque una muerte por parada cardíaca.

Por ello, en estos casos la hipoxia puede instaurarse por un defecto de oxígeno o por un defecto de distribución.

Además, en los casos de sumersión con supervivencia, la muerte puede llegar por alteraciones electrolíticas, causadas a su vez por el por el paso a la corriente sanguínea del líquido de sumersión.

En las asfixias mecánicas oxiprivas el mecanismo no actúa sobre el organismo, sino que lo hace sobre el ambiente donde se encuentra la persona.

#### 2.2.1.2 Ahogamiento por sumersión

A la luz de los trabajos conclusivos de los tres Congresos Mundiales de Ahogamiento celebrados hasta hoy (Amsterdam 2002, Porto i Matosinhos 2007 y Danang 2011) y acorde con el *International Liaison Committee on Resuscitation* (ILCOR 2015) y con la definición de la OMS en el 2002, podemos definir ahogamiento como el proceso que ocasiona una insuficiencia respiratoria primaria como resultado de una sumersión / inmersión en un medio líquido. Está implícita la entrada de líquido en la vía aérea de la víctima.

La dificultad respiratoria se inicia cuando el líquido entra en contacto con las vías respiratorias (o aéreas) de la víctima en inmersión (salpicaduras de agua en la cara) o por sumersión (las vías respiratorias se encuentran por debajo de la superficie del líquido).

Si la persona muere como resultado del ahogamiento se denomina “**ahogamiento letal**”.

Si el individuo es rescatado, el proceso de ahogamiento queda interrumpido, lo que se denomina **ahogamiento no letal**.

## **Fisiopatología del ahogamiento**

Cuando un individuo que se está ahogando no puede mantener la vía respiratoria libre de líquido, el agua que entra por la boca es expulsada o ingerida voluntariamente. La respuesta consciente siguiente es asegurar la función respiratoria, conteniendo la respiración, aunque esto no dura más de alrededor de un minuto. Cuando el estímulo respiratorio es demasiado fuerte, cierta cantidad del agua es aspirada a las vías respiratorias y la víctima tose como respuesta refleja. En raras ocasiones puede aparecer un laringospasmo, pero en tales casos se termina rápidamente con el inicio de una hipoxia cerebral. Si el individuo no es rescatado, la aspiración de agua continúa y la hipoxemia rápidamente da lugar a la pérdida del conocimiento y a apnea.

La secuencia del deterioro del ritmo cardíaco suele ser, en primer lugar, una taquicardia seguida de bradicardia, actividad eléctrica sin pulso y, por último, asistolia. En general, todo el proceso de ahogamiento, desde la sumersión o inmersión hasta el paro cardíaco, dura unos segundos a pocos minutos, pero, en situaciones excepcionales, como el ahogamiento en agua helada, este proceso puede prolongarse una hora.

Si es necesaria la reanimación cardiopulmonar (RCP), el riesgo de afectación neurológica es similar al de otros casos de paro cardíaco. Sin embargo, la hipotermia asociada al ahogamiento puede proporcionar un mecanismo protector que permite que el individuo sobreviva a episodios prolongados de sumersión, sin secuelas. La hipotermia puede reducir el consumo de oxígeno cerebral, retrasando la anoxia celular y la depleción de ATP (un elemento básico de la energía celular). La hipotermia reduce la actividad eléctrica y metabólica del cerebro de un modo dependiente de la temperatura. La tasa de consumo cerebral de oxígeno disminuye en alrededor del 5% por cada disminución de 1º C de la temperatura dentro de unos límites de 37 a 20º C.

## **La osmolaridad del agua: AGUA DULCE vs AGUA SALADA**

- **Sumersión en agua salada**

Es hipertónica, cuya osmolaridad cuadruplica la del plasma humano y desplaza los líquidos hacia los alveolos pulmonares, dificultando el intercambio gaseoso, provocando asfixia, hipoxia, acidosis, hipovolemia con hemoconcentración y edema pulmonar.

- **Sumersión en agua dulce**

Es hipotónica y pasa rápidamente desde el alveolo al torrente circulatorio, provocando hemodilución con hipervolemia, hiponatremia, hipoxia y edema pulmonar. Es posible la

aparición de hemólisis que provoca hiperpotasemia con el consiguiente riesgo de fibrilación ventricular.

Estas diferencias fisiopatológicas se han observado en ahogamientos experimentales, pero en la clínica, no se presentan diferencias significativas entre ahogamientos en agua salada y en agua dulce. La principal anomalía fisiopatológica, y la que determina la clínica en estos pacientes, es la HIPOXEMIA.

En ambos tipos de ahogamiento con aspiración de agua, el efecto osmótico en la membrana alveolo-capilar provoca una alteración de su integridad, afectando al surfactante, aumenta su permeabilidad y en consecuencia su función. El cuadro clínico causado por esta alteración de la membrana alveolo-capilar se traduce en edema pulmonar

### **Clínica del ahogamiento**

Las características clínicas son variables y dependen de factores como la cantidad de agua aspirada, la rapidez y eficacia del tratamiento, etc.

- **Alteraciones pulmonares**

Pueden aparecer de modo diferido. Pueden ser leves (tos ligera y taquipnea) o graves (que se manifieste como edema pulmonar no cardiogénico o síndrome de distress respiratorio). Otras complicaciones: atelectasias (por aspiración de material sólido), neumonía bacteriana, etc.

- **Alteraciones neurológicas**

Suelen ser por encefalopatía anóxica, pudiendo presentar convulsiones, agitación, obnubilación y coma. La anoxia cerebral se puede presentar entre los 4 y 10'. La resistencia a la anoxia aumenta al disminuir la temperatura del agua.

- **Alteraciones cardíacas y parada cardiorrespiratoria (PCR)**

El proceso del ahogamiento que desencadena una parada cardíaca puede ocurrir en segundos o en algunos minutos. En contadas ocasiones, muy poco frecuentes, tales como ahogamiento en aguas muy frías, el proceso puede durar hasta una hora.

- **Afectación térmica**

El agua, en condiciones normales, tiene una temperatura inferior a la del organismo, por tanto, todas las víctimas sufrirán hipotermia en mayor o menor grado. Ésta se desarrolla

rápidamente después de la inmersión, ya que la pérdida de calor corporal en el agua es 30 veces mayor que en el aire.

La respuesta inicial del organismo al frío, se encamina a conservar el calor corporal y a aumentar su producción. El estímulo simpático produce una vasoconstricción periférica, aumentando el volumen sanguíneo en pulmón e hígado, incrementando el gasto cardíaco, con taquicardia y aumento de la presión arterial, y la producción de calor mediante el escalofrío.

Por debajo de los 30°C cesa el escalofrío, desciende el metabolismo basal y el consumo de oxígeno. La frecuencia respiratoria baja significativamente. La fibrilación ventricular es frecuente por debajo de los 28°C. La asistolia por debajo de 20°C.

Por otro lado, y como comentamos anteriormente, el frío enlentece el metabolismo, aumentando la tolerancia a la hipoxia, lo que prolonga el tiempo de supervivencia posible. Estos datos, y otros, confirman el conocido el axioma de Reuler: "Ningún paciente hipotérmico debe considerarse muerto hasta que está caliente y muerto".

Sin embargo, hay que insistir que la hipotermia puede provocar, por sí misma, la muerte o complicar la reanimación del paciente.

- **Afectación traumatológica**

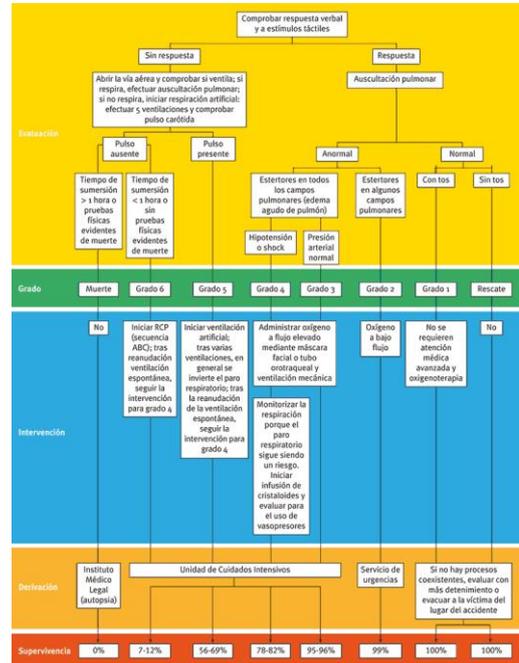
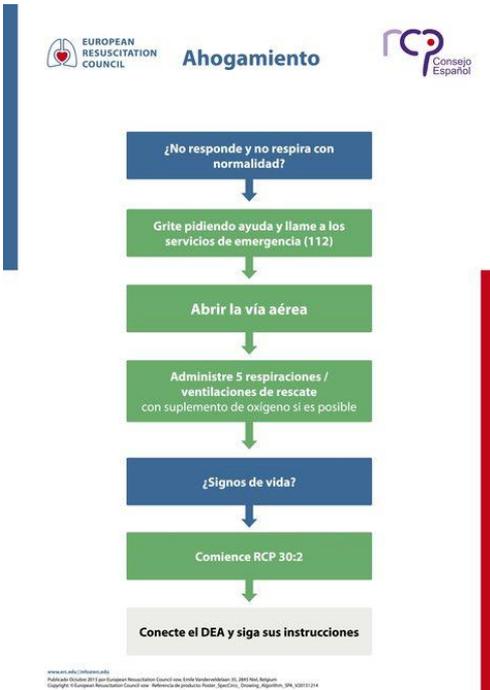
En todo ahogamiento hay que descartar posibles lesiones traumáticas. Las lesiones de la columna vertebral cervical afectan a menos del 0,7% de víctimas y la inmovilización de la columna cervical en el agua sólo está indicada en aquellos casos en los que se sospeche firmemente un traumatismo craneal o cervical (es decir, en accidentes de buceo, esquí acuático, surf, o de navegación).

### **Resumen evolutivo de la clínica de ahogamiento:**

Desde el punto de vista evolutivo, y de forma resumida, la clínica que puede presentar un ahogado es:

- Tos
- Taquipnea
- Aumento de la Resistencia del flujo aéreo
- Disminución de la Capacidad elástica pulmonar (compliance)
- Edema pulmonar
- Aparición de distress respiratorio (incluso pasadas las 72 h)

- Parada respiratoria
- Muerte



Algoritmo de soporte vital básico en ahogamiento. European Resuscitation Council

Clasificación del ahogamiento 2015 del European Resuscitation Council. Fuente: Guías del David Szpilman

### 2.2.1.3 Traumatismos. Atención inicial prehospitalaria del paciente traumático grave.

#### La Hora de Oro

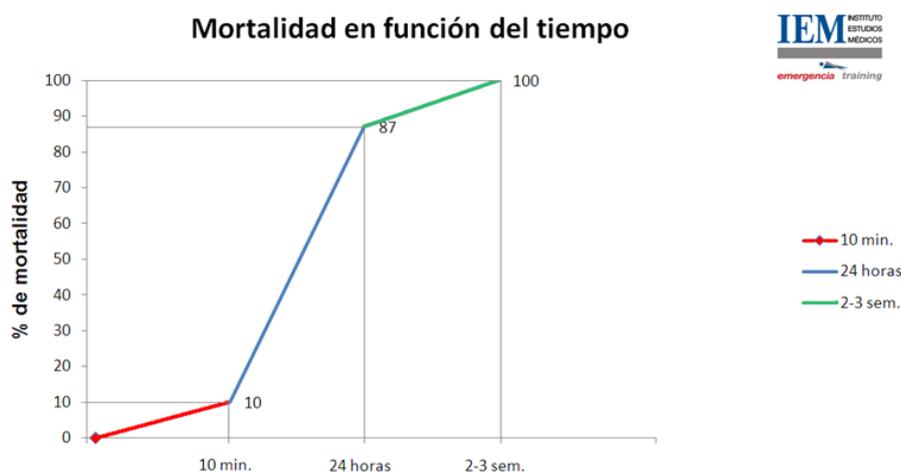
Uno de los principios básicos del tratamiento del paciente con traumatismo grave es el concepto "hora de oro" que se define como el periodo de tiempo tras el traumatismo en el cual las maniobras de resucitación y estabilización son de máximo beneficio para el paciente. En esta "hora de oro", un buen sistema de alerta, una buena asistencia prehospitalaria, incluyendo tiempos de asistencia y traslado adecuados y una buena atención en el hospital receptor, pueden condicionar la supervivencia del paciente.

El concepto de "Hora de Oro" fue acuñado inicialmente por el doctor Adams Crowley, cirujano militar y director del Centro de Atención al Shock traumático de Maryland. Según el Dr. Crowley, "hay una hora de oro entre la vida y la muerte. Si estás gravemente lesionado, tienes menos de 60 minutos para sobrevivir. Puedes no morir

*entonces, pero lo puedes hacer tres días o dos semanas después, porque algo ha ocurrido en tu cuerpo que es irreparable”.*

El 50% de las muertes por traumatismo grave se producen en el lugar del incidente. Durante el traslado de estos pacientes la mortalidad oscila entre el 2% y el 15%.

La mortalidad en los politraumatizados tiene, desde el punto de vista del tiempo, una característica de distribución trifásica:



### **1ª Fase.**

Ocurre en los primeros segundos o minutos tras la agresión y representa entre el 10% y el 15% de todas las muertes. Normalmente por lesiones incompatibles con la vida.

### **2ª Fase.**

La denominada “hora de oro”, ocurre en la primera o segunda hora tras el accidente. Constituye el mayor porcentaje de mortalidad: un 75% aproximadamente. Las muertes en esta fase se deben principalmente a obstrucciones de vía aérea o a pérdidas de volumen circulante. Es la fase en la que se pueden evitar el mayor porcentaje de fallecimientos a través de una asistencia sanitaria inicial adecuada, en tiempo y capacitación.

### **3ª Fase.**

Se presenta días o semanas tras el incidente traumático. Representa entre el 10% y el 15% de la mortalidad total. Se debe habitualmente a complicaciones tras el tratamiento inicial (fracaso multiorgánico, complicaciones postoperatorias, etc.). Son necesarios un gran esfuerzo y un gran número de recursos para reducir la mortalidad en esta fase. Las

secuelas dependerán del retraso en la prestación de asistencia y en la resolución asistencial definitiva en el medio hospitalario. Así, el factor tiempo es uno de los elementos esenciales en todo el proceso asistencial.

En todos los procesos debe tenerse en cuenta que se trata de una patología tiempo dependiente, en la cual, todas las decisiones asistenciales deben tener en cuenta el parámetro cronológico.

Distintos estudios realizados tanto en Europa como en EE.UU. han demostrado que la prestación de una asistencia sanitaria integral a las víctimas de accidentes graves (1,5%) es fundamental para disminuir la gravedad de los mismos entre un 15% y un 50% de los casos. Esta asistencia pasa por disponer de un adecuado servicio de emergencias médicas que preste atención sanitaria precoz e *in situ* al paciente, y de una red adecuada de centros hospitalarios con capacidad para atender a este tipo de pacientes (los denominados "Trauma Center"). Se ha demostrado que el traslado dirigido de los pacientes politraumatizados a los centros útiles, y no al hospital más cercano, puede suponer un descenso de la mortalidad.

- **Concepto de politraumático**

Podemos definir como politraumático al paciente que presenta una o más lesiones de origen traumático que, de forma aislada o asociada, pueden poner en peligro la vida del accidentado, inmediatamente o en los días posteriores al traumatismo.

La evolución del paciente politraumático depende del correcto funcionamiento de la cadena de socorro, donde es preciso conjugar la calidad asistencial con la rapidez en la respuesta.

Los elementos claves de la asistencia sanitaria *in situ* condicionan la morbi-mortalidad de este tipo de pacientes. Una actuación incorrecta de los equipos de rescate puede comportar la producción de lesiones importantes, o bien, el agravamiento de las existentes.

- **Abordaje inicial al paciente politraumático**

En este apartado se pretende resumir, de forma secuencial, los pasos a seguir en la fase prehospitalaria de la asistencia al paciente politraumático grave víctima de un accidente. Elemento clave de la asistencia sanitaria *in situ* que, como

hemos visto anteriormente, condiciona la morbi-mortalidad de este tipo de pacientes.

### **1º recepción de la alarma: 1-1-2**

La evaluación y los primeros pasos en la asistencia a una víctima de un accidente de tráfico comienzan justo en el momento de la recepción de la alarma. Continúan siendo de referencia las clásicas preguntas clave:

*¿Quién llama? ¿Desde dónde llama? ¿Qué le pasa?*

La existencia de un único teléfono europeo de emergencias está condicionando notablemente el tiempo de respuesta y pone las condiciones para una actuación integral, simultánea y coordinada de los equipos de intervención. Esta nueva realidad está afectando de forma determinante el pronóstico del paciente grave traumático en nuestro entorno.

#### ***Datos sobre el siniestro:***

<i>Datos personales del alertante:</i>	Nombre, teléfono de contacto
<i>Localización:</i>	Dirección exacta, sentido de la circulación, accesos, referencias, etc
<i>Tipo de accidente:</i>	Tráfico turismos, mercancías peligrosas, escalada, precipitado, etc,
<i>Personas afectadas:</i>	Número, aproximación a la gravedad (atrapados o no, conscientes o no, tipo de lesiones), hora del incidente...

*Primeras medidas de socorro practicadas.*

#### ***Consejos por teléfono:***

### **2º Asignación de recursos**

Desde la central de coordinación se procede a la elección del recurso más apropiado en función del tipo de siniestro.

Por regla general se precisa de la intervención, hasta que no se determine con seguridad lo contrario, de unidades operativas de policía, bomberos y sanitarios. Se trata de

asegurar la presencia en el lugar del accidente de los 3 ejes básicos en la atención prehospitalaria: seguridad, rescate y asistencia sanitaria.

### **3º Evaluación de la escena del accidente**

Una vez en el lugar del accidente los equipos de salvamento tienen que tener, previamente a la intervención, una visión global de la escena del accidente. Es imprescindible para poder contar con un primer análisis de las circunstancias y de los peligros latentes.

*Análisis de las circunstancias:*

- Peligros inherentes
- Número de afectados y estado de las víctimas
- Mecanismo lesional
- Estado de la vía y accesos
- Peligro de incendio

### **4º PAS (Proteger, Alertar, Socorrer)**

De forma secuencial tenemos que abordar el PAS.

#### ***PROTEGER:***

**“Es preciso buscar primero nuestra seguridad: los héroes muertos no pueden salvar vidas” (N.L. Caroline, 1987).**

Consiste en:

- Valorar siempre riesgo/beneficio.
- Tener siempre en cuenta la seguridad activa y pasiva de los equipos de salvamento.
- Eliminar el peligro o alejar a la víctima del peligro.

#### ***ALERTAR:***

- Al resto del equipo de intervención
- Al centro coordinador

Se debe analizar si son suficientes los recursos existentes o si son necesarias más unidades u otros servicios, etc. En este sentido se han de activar las ambulancias necesarias para poder garantizar una asistencia sanitaria suficiente y un traslado de víctimas adecuado.

## **SOCORRER:**

Rescate y asistencia sanitaria de las víctimas

### **5º El triage**

Las técnicas de triage son utilizadas en la presencia de más víctimas de las que pueden ser atendidas por los equipos desplazados al lugar del accidente. Tiene lugar en el momento del rescate, en el de la estabilización y posteriormente en la fase previa a la derivación del paciente al hospital de referencia. Se trata de priorizar unos heridos respecto a otros en función de los medios disponibles, humanos y materiales, y del entorno donde se ha producido el incidente.

### **6º El rescate**

El objetivo ha de ser siempre la colocación del paciente en la camilla de la ambulancia o del helicóptero medicalizado en las mejores condiciones posibles y sin agravar su estado.

Hay que tener en cuenta una serie de prioridades:

- La atención al paciente es prioritaria a su excarceración. En este sentido es posible que en determinadas actuaciones tengamos que retrasar las maniobras o modificarlas en función de las prioridades sanitarias.
- El conocimiento mutuo de la capacidad de trabajo de los equipos de intervención mejora cualitativamente el salvamento y rescate de las víctimas.
- Ante la duda, y basándonos en el mecanismo lesional, tenemos que sospechar siempre una lesión cervical en el paciente politraumático.
- La movilización de la víctima tiene que ser la mínima e imprescindible.
- Tenemos que intentar respetar siempre, en la medida de lo posible, el eje cabeza-cuello-tronco-pelvis-extremidades inferiores.

### **7º La asistencia sanitaria “in situ”:**

#### ***El Soporte Vital Avanzado en Trauma (SVAT)***

A continuación, se expondrá de forma genérica un resumen de las guías de actuación en Soporte Vital Avanzado en Trauma, según las guías actuales del *European Resuscitation Council* y del *European Trauma Course* (ETC)

## **VALORACIÓN INICIAL o PRIMARIA**

Es un proceso secuencial de valoración de las funciones vitales de mayor a menor importancia.

El objetivo será la identificación y el tratamiento de aquellas lesiones con Riesgo Inminente de Muerte (RIM).

En la valoración inicial de un paciente traumático es primordial seguir siempre una sistemática estricta. De esta forma, se evitan omisiones diagnósticas con posibles consecuencias gravísimas para el herido. Esta secuencia de actuaciones se conoce como el "ABCDE" (Alexander y Proctor 1993):

- A** Abrir la vía aérea con control bimanual del segmento cervical
- B** Valorar la ventilación y administrar oxígeno (*breathing*)
- C** Valorar la circulación con control de hemorragias
- D** Valoración básica del estado neurológico (*disability*)
- E** Exposición del paciente y protección contra la hipotermia

Debe realizarse antes el rescate y la liberación de la víctima, de forma somera y asegurando principalmente el A, B y C.

El paso de una actuación a otra comporta la resolución previa de la anterior. Es decir, mientras valoramos, resolvemos, paso a paso, los problemas que vamos detectando de forma progresiva.

## **VALORACIÓN SECUNDARIA**

Abordaremos la Valoración Secundaria una vez garantizada la estabilidad del paciente con la Valoración Inicial.

Su objetivo es establecer, de forma secuencial también, el balance global de las lesiones existentes por aparatos y sistemas orgánicos. Incluye la historia clínica completa, un examen físico sistemático y las pruebas complementarias necesarias (laboratorio, radiológicas, etc.) para el diagnóstico de todas las lesiones.

Durante su realización se deberá ir reevaluando continuamente la respuesta a las medidas adoptadas durante la Valoración Inicial y el control de las constantes vitales en general.

No ha de comportar una pérdida excesiva de tiempo ni cualquier otro retraso que pueda perjudicar al paciente. A nivel prehospitalario la iniciaremos mientras preparamos el traslado al centro hospitalario de referencia. Deberá completarse en el hospital.

## **DERIVACIÓN Y TRANSPORTE**

En coordinación con la central de emergencias (112) tenemos que decidir a qué hospital derivamos el paciente en función de su estado, del tipo de asistencia que precise en el traslado, de los medios de transporte y de la distancia al mismo.

Algunas recomendaciones a seguir serían:

- Garantizar durante el transporte una monitorización completa para control de las constantes vitales: frecuencia cardíaca (FC), tensión arterial (TA), saturación arterial de oxígeno por pulsioximetría (SpO<sub>2</sub>) y capnografía.
- Valorar posible traslado primario en helicóptero al hospital neuroquirúrgico de referencia. En todo caso tenemos que evitar un traslado secundario innecesario.
- Disponer de un sistema de activación y/o comunicación específico con la unidad de emergencias hospitalaria receptora.
- Tener muy presente la fisiopatología del transporte sanitario y actuar en consecuencia. Este tipo de enfermos son muy inestables y complejos por definición.
- Mantener una comunicación fluida con nuestra Central concretando:
  - Estado del paciente.
  - Destino hospitalario.
  - Tiempo de llegada al hospital.
  - Presencia de personal sanitario (médico/DUE) sí/no.

### **8º El ingreso al hospital de referencia. La transferencia**

Una vez en el hospital de referencia tenemos que llevar a término el cambio de la asistencia prehospitalaria a la hospitalaria. Este debe ser sistemático. A las explicaciones verbales se acompañarán las 2 hojas de intervención en emergencia: la médica y la de enfermería.

## Conclusiones

El manejo prehospitalario del politraumático presenta una serie de particularidades que nos deben de hacer reflexionar:

- No se trata de pacientes que podamos aislar del contexto del accidente, sino más bien todo lo contrario. Conceptos como autoprotección y PAS son básicos.
- La fisiopatología y el pronóstico dependerán del mecanismo lesional, del estado hemodinámico, del nivel de consciencia, de la zona u órganos afectados, del tiempo de respuesta, de la formación de los equipos implicados y de la rapidez con la que se inicien las primeras maniobras.
- El salvamento, la asistencia sanitaria *in situ* y el transporte de estos enfermos es difícil. Requiere personal formado y entrenado, capaz de dar una orientación precisa y rápida de la gravedad de las lesiones; capaz de tomar unas decisiones terapéuticas adecuadas y consciente de que constituye el primer eslabón en la larga cadena de la supervivencia.
- Esta cadena finalizará con el alta del paciente, después de haber pasado por reanimación, cirugía y rehabilitación, controlando las secuelas cicatriciales y reencontrando una autonomía funcional lo más amplia y satisfactoria posible.
- Por último, podemos afirmar con rotundidad que una pieza fundamental en la respuesta al paciente politraumático es la formación adecuada de todos los agentes implicados y muy especialmente del personal sanitario. En este sentido existe en el Cosell Català de Ressuscitació (CCR) un grupo de trabajo de formación en Soporte Vital Avanzado en Trauma (SVAT) y, en el resto España, también cientos de profesionales han superado ya este tipo de formación según el programa formativo de SVAT del Plan Nacional de RCP.

### 2.2.1.4 Termopatias: Hipotermia accidental e hipotermia

El ser humano es una especie homeoterma, de sangre caliente, lo que significa que regula activamente su temperatura entre 36°C y 37°C. A esta temperatura podemos mantener las funciones vitales de forma óptima.

#### Hipotermia accidental

Definimos hipotermia (del griego hypo que significa debajo y therme que significa calor) como la disminución de la temperatura corporal central (TCC) por debajo de 35°C (medida con termómetro en recto, tímpano o esófago).

Se clasifica como ligera (TCC 35-32°C), moderada (TCC 32-30°C) y severa (TCC inferior a 30°C).

A nivel genérico y según la causa, podemos clasificarla también en:

- **Inducida:** es la que se provoca artificialmente para obtener un beneficio terapéutico en un entorno hospitalario (ej.: cuidados post resucitación en las Guías 2015 de Soporte Vital del European Resuscitation Council)
- **Accidental:** se produce de forma espontánea e involuntaria causada por un entorno frío, asociada a un problema agudo, sin lesión previa del hipotálamo (zona anatómica cerebral donde se sitúa el termostato corporal).

El personal que trabaja en los servicios de emergencias prehospitalarios se puede encontrar con la necesidad de tener que asistir a víctimas de hipotermia accidental severa en diferentes entornos, algunos de ellos claramente hostiles.

Es fundamental saber reconocer, seleccionar y ofrecer una correcta primera atención prehospitalaria a las víctimas que sufren esta patología.

La International Commission for Mountain Emergency Medicine (ICAR MEDCOM), la International Society for Mountain Medicine and Medical Commission y la International Mountaineering and Climbing Federation (UIAA), han publicado guías de consenso para la clasificación y manejo prehospitalario de víctimas con hipotermia severa por accidentes de montaña. Los principios básicos de clasificación, reanimación y manejo de las víctimas de hipotermia accidental, son los mismos tanto en entorno marítimo, de montaña como en urbano.

### **Fisiopatología de la hipotermia accidental**

La termorregulación es el equilibrio entre la producción de calor (termogénesis) y la eliminación de calor (termólisis). Es un equilibrio activo para mantener la temperatura corporal lo más cerca posible a 37°C. En una situación de hipotermia ligera, los mecanismos de termorregulación funcionan al máximo en un intento de combatir la pérdida de calor. Si la situación empeora y la temperatura central sigue disminuyendo, el sistema termorregulador se agota pudiendo llegar a la muerte del paciente por fallo cardiorrespiratorio.

## **Factores que facilitan la aparición de la hipotermia**

Ambientales:

- Temperatura ambiental: el frío.
- Viento: la velocidad del viento aumenta la pérdida de calor.
- Humedad.
- Altitud.

Personales:

- Edades extremas: niños y ancianos son menos resistentes al frío.
- Enfermedades: hipotiroidismo, coma, traumatismos, hipoglicemia, etc.
- Inmovilidad: disminución de la producción de calor.
- Deshidratación: disminución del agua circulante.
- Equipo personal inadecuado: insuficiente protección contra el frío.
- Fatiga: produce deshidratación y vasodilatación.
- Intoxicaciones: ingesta de alcohol, drogas, relajantes musculares, etc.

### **El frío como principal factor desencadenante**

La hipotermia accidental, normalmente, es el resultado de:

- Una lesión inmovilizadora en un entorno frío.
- Exposición en un entorno frío y sin protección adecuada.
- Inmersión en aguas frías.

La acción central del frío, como causante fundamental de la hipotermia accidental, y de las congelaciones, dependerá de:

- La intensidad.
- El tiempo de exposición al frío.
- Otras condiciones relacionadas con el entorno: viento, humedad, altitud (la temperatura disminuye 0,5°C cada 100 metros de altitud), hipoxia (disminución de oxígeno) o deshidratación. (Ver tabla)

## **Efecto de la hipotermia sobre órganos y sistemas**

- **Sistema Cardiovascular**

Se produce taquicardia, vasoconstricción cutánea, temblor/contracciones musculares con aumento del consumo de oxígeno. A temperaturas inferiores a 32-34°C aparece bradicardia, también disminuye la TA y la diuresis.

- **Aparato respiratorio**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que disminuye con el descenso de la temperatura, contribuye a la disminución de la frecuencia respiratoria habitual en estos pacientes.

- **Sistema Nervioso Central (SNC)**

Progresivamente se ven alteraciones en la conducta como: afasia, disartria, ataxia, cambios de conducta (irritabilidad, quitarse ropa de abrigo...). Depende del paciente, ya que algunas personas son capaces de mantener una conversación normal a temperaturas <30°C.

- **Función renal**

La conocida diuresis por frío se debe a una respuesta adrenérgica inicial con aumento del gasto cardíaco, a una alteración de la capacidad renal de concentración de la orina y al aumento del volumen plasmático central debido a la vasoconstricción periférica. La pérdida de líquido puede ser tan importante como para necesitar sueroterapia intensa en el tratamiento de las víctimas de hipotermia.

- **Endocrinología y metabolismo**

Los receptores adrenérgicos se alteran en la hipotermia severa, por lo que los fármacos tienen una actividad errática. Pueden no ser efectivos inicialmente, acumulándose hasta niveles tóxicos y produciendo efectos no deseados cuando el paciente se recalienta. Aumento de la secreción de insulina y de glucogenólisis, lo cual provoca hipoglicemia. Acidosis por aumento de la producción de ácido láctico por el temblor y la contractura muscular de tejidos con mala perfusión.

- **Coagulación**

Trastornos que van desde la coagulación intravascular diseminada a un alargamiento del tiempo de coagulación.

- **Función hepática**

Alterada, lo que comporta una disminución en la metabolización de fármacos, su acumulación, y la de diversos metabolitos, como el ácido láctico.

- **Extremidades**

Las extremidades son muy vulnerables a la congelación como resultado de la vasoconstricción, de la hipoperfusión y de la hemoconcentración.

### **El paciente politraumático y la hipotermia**

Hasta bien adentrada la década de los 80 se consideraba que la "tríada letal" formada por hipotermia, acidosis y coagulopatía era la mayor causa de mortalidad de los heridos en situación crítica. Incluso en ambientes urbanos con un tiempo de transporte hasta el hospital más próximo inferior a 15 minutos, más del 50% de los pacientes con lesiones penetrantes estaban hipotérmicos al ingresar en el servicio de Urgencias.

Naturalmente que el clima y la temperatura ambiente influyen en esta cifra. Comparada con la de los pacientes normotérmicos, la mortalidad aumenta hasta 50% más en los pacientes hipotérmicos según diversos estudios hechos en traumáticos.

Los pacientes muy jóvenes, o muy añosos, los que presentan quemaduras, traumatismos craneoencefálicos (los mecanismos de termorregulación hipotalámicos se pueden ver alterados) y los pacientes con lesión de la médula espinal alta, son especialmente propensos a la hipotermia.

Estos pacientes se tienen que considerar poiquilotérmicos o con escasa respuesta de defensa frente a la pérdida de calor. La prevención para minimizar la pérdida de calor y, si está indicado, el recalentamiento activo, es esencial para una buena asistencia a los heridos.

Recordemos algunas de las afirmaciones en las cuales hemos estado insistiendo en anteriores números de la revista:

“En la valoración inicial de un paciente traumático es primordial seguir siempre una sistemática estricta con el objetivo de identificar aquellas lesiones que puedan poner en peligro la vida del paciente para abordarlas de forma inmediata.”

Como decíamos, esta sistemática estricta consiste en una secuencia de actuaciones que se conoce como el “ABCDE” (Alexander y Proctor, 1993).

El paso de una actuación a otra comporta la resolución previa de la anterior. Es decir, mientras valoramos resolvemos, paso a paso, los problemas que vamos detectando de forma progresiva.

GRADO I	35-32°C	Paciente consciente y con temblores.
GRADO II	32-28°C	Paciente somnoliento que no tiembla.
GRADO III	28-24°C	Paciente inconsciente pero con signos vitales presentes.
GRADO IV	24-13°C	Ausencia de signos vitales, muerte aparente.
GRADO V	<13°C	Muerte por hipotermia irreversible.

Tabla: Clasificación de la hipotermia en la primera asistencia según la situación clínica.

Se han descrito casos en los cuales pacientes severamente hipotérmicos se han reanimado con éxito después de diversas horas de asistolia.

El paciente con la temperatura más baja a quien se ha podido reanimar sin lesiones neurológicas estaba a 13,7°C.

Hay que recordar que no se puede reanimar a todas las personas con hipotermia, ya que la hipotermia puede ser la consecuencia (hipotermia secundaria) y no la causa de la muerte.

### **Atención prehospitalaria de la hipotermia accidental**

La primera maniobra a realizar es situar a la víctima en un lugar seguro, donde no se produzcan más pérdidas de calor, retirando la ropa húmeda o mojada y reemplazándola por ropa seca.

Actuaremos según el grado de hipotermia que presente el paciente:

#### **1. Hipotermia Grado I (35-32°C)**

La víctima está consciente y se puede mover. Tendremos que:

- Animarla a hacer ejercicio físico.
- Se pueden administrar bebidas calientes azucaradas.
- Sólo se trasladará al hospital en caso de sospecha de una lesión oculta.

#### **2. Hipotermia Grado II (32-28°C)**

La víctima está somnolienta y no tiene capacidad para temblar, es muy susceptible a sufrir arritmias letales (FV/TV y asistolia). Tendremos que:

- Tener especial cuidado al movilizar al paciente; especial atención al cambio de ropa: retirarla cortando.
- Iniciaremos el recalentamiento con los medios disponibles; aire u oxígeno caliente, bolsas de agua caliente; colocarlas sobre las áreas más vascularizadas como cuello, axilas, ingles...evitando el contacto directo con la piel.
- Evacuar a un hospital con unidad de cuidados intensivos.
- Zonas de aplicación de las fuentes de calor

### **3. Hipotermia Grado III (28-24°C)**

El paciente está inconsciente pero con signos vitales presentes, tiene alta probabilidad de arritmias letales. Tendremos que:

- Tener especial cuidado al movilizar al paciente.
- Aislarlo y protegerlo del frío.
- Administrar oxigenoterapia caliente y humidificada.
- Monitorizar.
- Evacuar al paciente sin demora a un hospital con posibilidad de recalentamiento extracorpóreo.

### **4. Hipotermia Grado IV (24-13°C)**

Paciente con ausencia de signos vitales y muerte aparente. Tendremos que:

- Antes de llegar a la conclusión de que el paciente está en paro cardíaco, se recomienda monitorizarlo (ECG) durante un minuto. Si verificamos que está en parada cardíaca hay que realizar maniobras de RCP con intubación orotraqueal (IOT), canalizaremos vía periférica y administremos fluidoterapia caliente. Hay que tener en cuenta que una vez se empieza la reanimación no la podemos parar hasta llegar al hospital de referencia.
- También evitaremos el enfriamiento posterior tal y como hemos hecho en los anteriores grados de hipotermia.
- Trasladaremos a un hospital de tercer nivel con posibilidad de recalentamiento con circulación extracorpórea.

**Efecto de recaída: *afterdrop***

Se llama "afterdrop" al descenso continuado de la temperatura central cuando ya se ha protegido a la víctima del frío y que aparece durante el recalentamiento, tanto externo como interno.

El descenso de la temperatura central puede llegar a provocar fibrilación ventricular a pesar de haber empezado el recalentamiento. Se supone que se debe a la redistribución de sangre procedente de territorios fríos que devuelve al núcleo central cuando reaparece el gasto cardíaco por las maniobras de reanimación o de recalentamiento.

### **Hipertermia**

El evidente y continuado esfuerzo físico de los buceadores, y las altas temperaturas registradas en la zona de trabajo hiperbárico, obligan a tener en cuenta esta patología no presente en un entorno normal de buceo.

La hipertermia se produce cuando fracasa la capacidad corporal de termorregulación y la temperatura central excede la que normalmente mantienen los mecanismos homeostáticos. La hipertermia es un continuo de situaciones relacionadas con el calor corporal, empezando por el estrés térmico, progresando al agotamiento por calor, el golpe de calor y finalmente fracaso multiorgánico y parada cardíaca. La base del tratamiento es la terapia de soporte y el enfriamiento rápido del paciente. Si es posible se debe comenzar el enfriamiento en el ámbito prehospitalario. Se debe tratar de reducir rápidamente la temperatura central a 39°C aproximadamente. Si se produce la parada cardíaca, seguir las recomendaciones estándar y continuar el enfriamiento del paciente. Se den utilizar las mismas técnicas de enfriamiento que en el manejo con control de temperatura tras la parada cardíaca.

### **Conclusiones en las termopatías**

Los servicios de emergencias prehospitalarios nos podemos encontrar con este tipo de pacientes tanto en entornos seguros como en ambientes claramente hostiles.

Es fundamental saber reconocer, seleccionar y ofrecer una correcta primera atención prehospitalaria a las víctimas que sufren esta patología.

En estos pacientes conceptos como autoprotección y PAS son básicos.

La fisiopatología y el pronóstico dependerán del mecanismo lesional, del estado hemodinámico, del nivel de consciencia, de la zona u órganos afectados, del tiempo de

respuesta, de la formación de los equipos implicados y de la rapidez con la que se inicien las primeras maniobras.

El salvamento, la asistencia sanitaria "in situ" y el transporte de estos enfermos es difícil. Requiere personal formado y entrenado, capaz de dar una orientación precisa y rápida de la gravedad; capaz de tomar unas decisiones terapéuticas adecuadas y conscientes de que constituye el primer eslabón en la larga cadena de la supervivencia.

## **2.2.2 Accidentes disbáricos (ADB).**

### **2.2.2.1 Enfermedad Descompresiva (ED)**

Siguiendo las leyes de disolución y difusión de los gases comentadas anteriormente, los tejidos se encontrarán en fase de subfacturación y empezarán a absorber  $N_2$  para equilibrarse nuevamente. Durante el descenso, por aumento de la presión aumenta el nitrógeno disuelto hasta un nuevo equilibrio por la nueva presión y por cada tejido. Pero esta saturación ocurre en un gradiente y a ritmos diferentes según el tejido. La sangre y los tejidos nerviosos se saturan más rápidamente. Los tejidos grasos, muy presentes en el sistema nervioso, tienen mayor coeficiente de solubilidad para el  $N_2$ . Los huesos y los tendones son los que más tardan. El proceso inverso se produce en el ascenso, al remontar a la superficie: los tejidos de un buzo estarán es sobresaturación de  $N_2$  y tenderán a liberarlo a tasas equivalentes de desaturación.

Si la presión circundante es muy inferior a la presión de  $N_2$  de un tejido, el gas disuelto (es decir en forma líquida) no podrá ser evacuado del tejido por difusión. Lo que sucede entonces es que el  $N_2$  volverá nuevamente a su fase gaseosa dentro del tejido. Es decir, que se formarán burbujas dentro de los tejidos que normalmente no deben presentar fase gaseosa. En un ascenso controlado es normal que se formen algunas microburbujas de  $N_2$  y de  $CO_2$  que son eliminadas progresivamente por vía pulmonar. Pero si el ascenso se hace demasiado rápido, o sin respetar las paradas de descompresión, la cantidad y la talla de microburbujas pueden ser más importantes. Estas tenderán entonces a formar macro burbujas. La diferencia de presiones del gas entre la sangre y los tejidos puede precipitar su liberación brusca y desordenada. Lo harán en cantidad superior en tejidos más ricos en grasa, como el SNC, el pániculo adiposo o la grasa periarticular. Otras burbujas son recogidas por la circulación venosa y pueden dar lugar a un cuadro de embolismo venoso y a fenómenos hemodinámicos y reológicos complejos. Nos encontramos, en este caso, con una forma muy específica

de patología del buceo con escafandra autónoma que se le conoce con el nombre de accidente de descompresión.

El accidente de descompresión se provoca por una situación de sobresaturación tisular por encima de un nivel crítico. La presencia de burbujas en el tejido sanguíneo puede provocar trombos (trombosis), embolias e incluso la necrosis de los tejidos. Los efectos pueden ser inmediatos o progresivos.

Por lo que se refiere a la clínica podemos decir que la sintomatología de los accidentes descompresivos más graves suele aparecer en las últimas etapas del ascenso, todavía en el agua, o bien en los momentos inmediatos a la emersión. En agresiones disbáricas menores suele aparecer horas después. Por lo tanto, hay un periodo de latencia que depende de la gravedad del accidente y de factores individuales aceleradores como la edad, la obesidad, el esfuerzo físico, el frío y la ingesta etílica.

Esta patología se creía específica del buceo con escafandra autónoma hasta que el médico mallorquín de la FEDAS Joan Miquel Batle demostró que también afecta a los practicantes de apnea y, muy concretamente, a los deportistas de pesca submarina.

Los factores que influyen en la fisiopatología de esta entidad clínica son:

Profundidad máxima, tiempo total en el fondo, minutos de descompresión, perfil de la inmersión, ejercicio y trabajo en el fondo, control de flotabilidad (estabilidad en una cota de presión), accidentes y traumatismos bajo el agua (en condiciones hiperbáricas), fatiga, trastornos respiratorios, frío, estrés, variabilidad individual.

### **Clasificación clínica de la ED**

Se continúa utilizando la clasificación clásica de la ED:

- La ED tipo I (leve), cuyo síntoma más frecuente es el dolor mono u oligoarticular,
- La ED tipo II (grave), en sus tres formas clínicas (neurológica, vestibular y pulmonar).

### **Descompresión omitida. Estimación del riesgo de enfermedad disbárica**

En este concepto se engloban todos los pacientes buceadores asintomáticos que han omitido una parada de descompresión después de inmersiones largas y/o profundas. En estos casos existe la posibilidad de desarrollar con posterioridad una ED.

Las Unidades de Medicina Hiperbárica (UMH) con experiencia adoptan diferentes actitudes en función de su criterio clínico y experiencia. En algunos manuales de buceo

de prestigio se recomienda re-comprimir el buceador según la Tabla 5-USN. En la práctica médica muchos profesionales con experiencia en este ámbito son reacios a recomprimir buceadores asintomáticos con la sola intención de evitar un riesgo potencial que nunca ha sido determinado. La decisión es clara en muchos casos, pero en otros es difícil.

#### 2.2.2.2 **Síndrome de Hiperpresión Intratorácica (SHI)**

Es el accidente más grave que se puede producir en la práctica del submarinismo con escafandra después del ahogamiento.

A medida que un buzo desciende, el volumen de aire disminuye debido a la presión. Los compartimentos en "caja" deben ser suficientemente elásticos para permitir la compresión del volumen o deben ser compensados activamente por el buzo. Los senos nasales, paranasales y frontales, así como los canales auditivos (trompas de Eustaquio) deben compensarse mediante la maniobra de Valsalva u otras técnicas. El buzo con escafandra autónoma, al tener una fuente de aire autónoma y equilibrada a la presión ambiente reemplaza el volumen pulmonar con un mayor aporte de aire a medida que respira en el descenso; pero debe tener especial cuidado durante el ascenso.

Durante el ascenso todo el aire contenido en el aparato respiratorio se sobreexpansiona en proporción inversa a la disminución de la presión. Por este motivo debe expulsarse a medida que se asciende a la superficie todo el aire sobrante de los pulmones. La emersión debe ser lenta y pausada con el fin de permitir este intercambio.

En buceo con escafandra autónoma los accidentes ligados a este efecto son barotraumatismos mecánicos. Los más frecuentes son las hemorragias en los senos faciales y la rotura de tímpano. Los más graves, los barotraumatismos pulmonares: por sobrepresión.

En situaciones de emergencia, el buceador puede verse obligado a ascender bruscamente y a abandonar en apnea la profundidad de trabajo. La situación se puede convertir en trágica si retiene la respiración durante el ascenso o aparece algún impedimento en la citada evacuación de aire sobrante. Los pulmones llegan al límite de dilatación y los alvéolos se rompen generando un neumotórax (el aire escapa a la cavidad torácica), un enfisema mediastínico dado que el aire escapa a la cavidad del corazón, un enfisema subcutáneo al avanzar este aire disecando tejidos siguiendo la pared de la tráquea al cuello, tórax, etc., una embolia gaseosa cuando el aire escapa por las venas y arterias y un edema pulmonar agudo al romperse los vasos alveolares

e inundar los pulmones de sangre. Este cuadro clínico recibe el nombre de Síndrome de Hiperpresión Intratorácica o Sobre Expansión Pulmonar o Sobrepresión Pulmonar.

Este fenómeno es independiente de la duración de la inmersión y puede aparecer desde profundidades mínimas.

### **2.2.2.3 Edema Agudo de Pulmón no cardiogénico por inmersión (EAPI)**

El EAPI es un síndrome que se caracteriza por dispnea, tos, expectoración de esputo teñido de sangre e hipoxemia, que puede ocurrir también en individuos sanos durante el buceo o la natación de superficie. Desde su primera descripción en 1989 por Wilmshurst et al. en buceadores de aguas frías se han publicado muchos informes de casos.

El EAPI también puede ocurrir en nadadores y buceadores sanos, debido probablemente al fallo por estrés de los capilares pulmonares derivado del incremento de la presión vascular pulmonar.

Se desconoce el predominio de edemas pulmonares durante el submarinismo y la natación de superficie, pero probablemente no se ha informado sobre ello.

Los factores potenciales que contribuyen al desarrollo del edema pulmonar en el buceo o la natación son las condiciones físicas pobres, disfunciones cardiovasculares subyacentes, hipertensión, asma, ansiedad y enormes esfuerzos antes, durante y después del buceo.

Los factores externos que contribuyen al desarrollo del edema pulmonar son la exposición térmica, los efectos de un traje de neopreno demasiado ajustado, exposición a irritantes respiratorios en la fuente de aire comprimido, aumento en el trabajo (o resistencia) respiratorio debido a una presión de aire baja en la bombona de aire, aspiración de partículas en el suministro de aire y mal funcionamiento o mal estado de la reparación del regulador.

La inmersión causa la agrupación central de sangre a través del retorno venoso, lo cual incrementa la precarga. A este cambio físico de la centralidad de la sangre durante la inmersión también le ayuda la alta densidad del agua, que disminuye o elimina la agrupación habitual en aire de la sangre en las venas periféricas (a este respecto, la inmersión es análoga al estado de no gravedad).

El EAPI sucede cuando la permeabilidad capilar pulmonar se incrementa (no cardiogénico), cuando la presión hidrostática capilar pulmonar excede la presión oncótica de plasma, o ambos. En los nadadores y submarinistas, un incremento del gradiente de la presión transalveolar debido a la combinación de factores se ha implicado en la patogénesis de la enfermedad. El camino final común parece ser fallo por estrés de los capilares pulmonares que se manifiesta a través de una fuga en la capa capilar endotelial y la capa alveolar epitelial, y a veces el colapso de todo el grosor de la pared alveolar o incluso una verdadera hemorragia. La naturaleza exacta del estrés en los submarinistas y las víctimas de inmersión no está clara, pero pueden deberse a un gran incremento de la presión capilar pulmonar por la descarga del sistema simpático, el desarrollo de una alta presión intratorácica negativa debida a múltiples factores, o hasta ahora a respuestas indefinidas bioquímicas o adrenérgicas en condiciones encontradas durante el nado y el buceo.

En la bibliografía médica existen pruebas en informes que apoyan la idea de que el EAPI representa una forma de edema pulmonar hemodinámico, probablemente causado por el incremento de los efectos aditivos de la inmersión inducida en el volumen de sangre pulmonar y en la hipertensión de la arteria pulmonar debido al esfuerzo. Las pruebas de una etiología hemodinámica también incluyen la observación de que cuando se nada en posición de decúbito lateral, el edema unilateral tiende a crearse en el pulmón dependiente.

El EAPI suele ocurrir en agua fría. Se ha informado de que los individuos que han sufrido este cuadro poseen una respuesta vasoconstrictora exagerada al frío, sugiriendo que durante la inmersión en agua fría el edema pulmonar hidrostático proviene de la combinación de un incremento en la poscarga y la precarga. El mecanismo más frecuente implica el fallo por estrés de los capilares pulmonares como resultado del incremento de la presión vascular pulmonar.

En nuestro caso la temperatura del agua era lo suficientemente fría como para esperar una vasoconstricción periférica en el agua, trayendo consigo un mayor incremento en el volumen central de sangre a expensas del volumen periférico

El aumento de la ventilación en sujetos sin formación puede ser causado por la acumulación de lactato en los músculos locomotores y/o respiratorios y posiblemente por la acidosis metabólica sistémica. En comparación con el ejercicio en seco, el ejercicio submarino es más propenso a provocar fatiga en el músculo respiratorio. Durante un ejercicio fuerte, los músculos respiratorios pueden participar con los

músculos locomotores en el flujo de sangre. Durante la fatiga del músculo respiratorio, el flujo de sangre que va hacia los músculos locomotores puede disminuir. Además, si la ventilación aumentada refleja una pauta de ventilación menos eficiente, la acidosis metabólica se podría agravar por la acidosis respiratoria. Se podría esperar que la acidosis metabólica y/o respiratoria incrementara la presión y la resistencia vascular pulmonar (PVR), y de hecho este periodo de tiempo (10 – 12 minutos) es constante en el inicio de los síntomas del EAPI en muchos informes. Incluso aunque durante la hiperoxia hiperbárica normocapnica hay un efecto vasodilatador en la vasculatura pulmonar en reposo, éste se podría compensar o eliminar con una hipercapnia inducida por depresión hiperóxica en la actividad respiratoria.

En resumen se ha demostrado que:

1. La causa del incremento de la ventilación durante el ejercicio de inmersión con una duración de más de 10 minutos es la acidosis metabólica y respiratoria, la cual produce una elevación contaminante de la presión arterial pulmonar.
2. La hiperoxia atenúa el aumento de la presión arterial pulmonar, a pesar del alto PCO<sub>2</sub>, durante el ejercicio a partir de 4.7 ATA.
3. La naturaleza del estrés de los capilares pulmonares puede deberse a un gran incremento de la presión capilar pulmonar por la descarga del sistema simpático, el desarrollo de una alta presión intratorácica negativa debida a múltiples factores, o hasta ahora a respuestas indefinidas bioquímicas o adrenérgicas en condiciones encontradas durante el nado y el buceo.

#### 2.2.2.4 **Clínica de los ADB por orden de prevalencia**

Dolor muscular y/o periarticular, parestesias, marcha atáxica, náuseas, vómitos, vértigos, paresias, retención urinaria por parálisis vesical (vejiga neurógena), astenia, neumotórax, disnea, cefaleas, lesiones cutáneas (que pueden ser particulares, ampulosas, cianopruriginosas aisladas, erupciones petequiales y purpúricas), alteración visual, paraplejia, hemoptisis, convulsiones, neumomediastino, insuficiencia respiratoria, dolor torácico, afasia, shock, enfisema subcutáneo, rinolalia, alteración de la audición, pérdida de fuerza, plejías, hemoconcentración, alteración de la consciencia, etc. El cuadro clínico y el antecedente de una inmersión con escafandra sugieren en la mayoría de los casos el diagnóstico de ADB.

### 2.2.2.5 **Guía básica de actuación en el abordaje y tratamiento prehospitalario de los trastornos disbáricos embolígenos**

La presente guía de intervención fue una adaptación de la utilizada como procedimiento en caso de accidentes de buceo

#### **1. Consideraciones previas**

- Todo accidentado disbárico puede padecer hipotermia (HT).
- Ante la duda, en cualquier accidente en hiperbaria se considera la existencia simultánea de ED, SHI, e Hipotermia.
- En consecuencia, todos los pacientes disbáricos deben considerarse inicialmente potenciales enfermos críticos.

#### **2. Prevención**

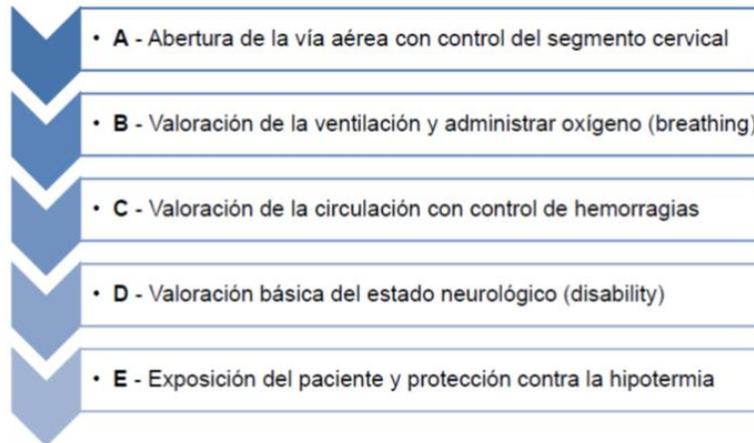
- Formación y titulación adecuadas.
- Preparar la intervención con anterioridad atendiendo a las normas de seguridad en el buceo y a las tablas correspondientes.
- Asegurarse de tener el equipo completo y en perfecto estado.
- Poseer un buen estado físico en el momento de la intervención.
- Estar al corriente de las revisiones médicas de buceo realizadas por médicos con titulación universitaria en Medicina Subacuática e Hiperbárica.
- Llevar a cabo la emersión de forma lenta y pausada y realizar, si estuviera indicado, en determinadas presiones las paradas de descompresión correspondientes según tablas.

#### **3. Soporte Vital Básico (SVB), Instrumentalizado (SVBI) o avanzado (SVA)**

- Debe iniciarse en el interior de la zona de trabajo, si es necesario, según las recomendaciones 2015 del *European Resuscitation Council* (ERC).

#### **4. Continuar con la valoración inicial y resucitación**

- Aplicar el A, B, C, D y E. Es muy importante definir en este apartado el estado hemodinámico y neurológico inicial del paciente.
- En la E es de máxima importancia el mantenimiento de la temperatura. Ante un traumático, un ahogado o un accidente disbárico debemos actuar siempre contra la hipotermia



## 5. Desnitrogenación

Administrar O<sub>2</sub> al 100% de inmediato (o a las máximas concentraciones posibles). Utilizaremos, en el caso de poder disponer de ellos, dispositivos de desnitrogenación específicos de buceadores (equipos de administración de oxígeno normobárico). Como alternativa a éstos se debe utilizar un sistema de bajo flujo con mascarilla reservorio tipo Monaghan a 15 litros/minuto.

## 6. Rehidratación

Administrar líquidos 1000-2000 ml. vía oral durante la primera hora (1/2 vaso cada 5 minutos aprox.) sólo en pacientes plenamente conscientes. Fluidoterapia endovenosa, en los casos graves, con suero salino fisiológico, Ringer Lactato o expansores plasmáticos, si fuera necesario, con un control estricto del estado hemodinámico.

## 7. Otros

Sondaje vesical de descarga (no permanente) si estamos ante un cuadro de retención urinaria. Esta técnica puede esperar dependiendo del tiempo de llegada al hospital donde se podrá llevar a cabo en mejores condiciones

**8. Valorar tratamiento hiperbárico “in situ”, según tablas, y a criterio del personal médico cualificado.**

**9. Traslado urgente medicalizado hacia una Unidad de Medicina Hiperbárica (UMH)**

La tuneladora disponía de un plan de contingencias que entre otros debe especificar la cámara hiperbárica de referencia a menos de dos horas de la zona de inmersión.

**Recomendaciones para el traslado:**

- Utilizar el medio de transporte más adecuado en función del estado clínico del paciente, la distancia hasta el centro hospitalario con UMH y de la disponibilidad de unidades.
- Evitar movimientos bruscos en el traslado.
- Es conveniente que el compañero de buceo acompañe al accidentado para poder detallar lo mejor posible las características de la intervención en la UMH.
- Valorar, en el caso de transporte aéreo, las condiciones barométricas.



Simulacro de intervención y traslado urgente medicalizado en una unidad de SVA. Foto IEM

## 10.Recompresión en cámara hiperbárica multiplaza

La Oxigenoterapia hiperbárica (OHB) es la única terapéutica etiológica conocida.



Interior y mesa de control de la cámara hiperbárica multiplaza del Hospital de Palamós. Fotos IEM

## 11.Tratamiento médico complementario

Dependiendo del cuadro clínico.

Cuando se produce un accidente de buceo, como en cualquier emergencia, la actuación coordinada y rápida de los equipos de rescate y primeros auxilios, el transporte y su tratamiento prehospitario influirán decisivamente en el desenlace.

Los primeros actuantes, los propios buceadores compañeros de la víctima, son determinantes en la morbimortalidad de estos pacientes.

Gracias a la obligatoriedad de una formación previa en seguridad, y muy concretamente en primeros auxilios, el buceador tiene totalmente interiorizados los riesgos inherentes a su actividad. Se demuestra nuevamente que la prevención y la formación de calidad son básicas en la lucha contra los accidentes.

### **3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

En función de los riesgos mencionados anteriormente y las características del trabajo, nos preguntamos:

¿Es posible, mediante medidas preventivas y de seguridad específicas, reducir al máximo la accidentabilidad, y las afectaciones relacionadas con este entorno hiperbárico de alto riesgo evidente, en los trabajadores responsables de las tareas de inspección, mantenimiento y reparación de urgencia de la corona en condiciones hiperbáricas?

#### 4. HIPÓTESIS

- La aplicación de las medidas preventivas diseñadas conduce a que el nivel de accidentalidad de los trabajadores en condiciones hiperbáricas estudiados no está en condición de inferioridad a los estudiados como grupo control (sin condiciones hiperbáricas).
- Los trabajadores acceden al lugar de trabajo hiperbárico en condiciones dentro de la normalidad fisiológica.
- Los trabajadores, a la salida, presentan parámetros dentro de la normalidad, o con desviaciones respecto a la entrada dentro de la normalidad.
- Los trabajadores estudiados no presentan condiciones de inferioridad respecto a los controles.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo general**

Evaluar las medidas preventivas propuestas e implementadas por el IEM con el soporte de empresas del buceo profesional y de los servicios preventivos de la UTE Túnel Sabadell.

### **5.2 Objetivos específicos**

- Describir las condiciones fisiológicas de los trabajadores previas a la intervención hiperbárica
- Describir las condiciones fisiológicas de los trabajadores a la salida de la intervención hiperbárica
- Valorar la evolución de los parámetros fisiológicos de los mismos.
- Generar una guía de prevención y seguridad para los trabajos en tuneladoras EPBs

## **6. MATERIALES Y MÉTODO**

### **6.1 Población y lugar objetos de estudio**

La población objeto del estudio fueron 60 buzos profesionales que trabajaban en condiciones hiperbáricas.

La población de control fueron 30 mecánicos de la tuneladora, que trabajaban realizando exactamente las mismas funciones de mantenimiento y cambio de herramientas, en condiciones normobáricas.

Como lugar y tiempo del estudio se determinó que fuera en las obras de construcción del túnel del metro de Sabadell durante todo el tiempo que duración de estas. Las obras se iniciaron en el 2008 y tuvieron con una duración aproximada de 5 años.

Como medidas preventivas y de control se implementaron las que fueron elaboradas “*ad-hoc*” y fueron especificadas en el Plan de Emergencias de la UTE Túnel Sabadell.

Las variables de estudio que se determinaron, y que fueron tomadas a pie de tuneladora, fueron: Presión arterial (PA), Frecuencia cardíaca (FC), Frecuencia respiratoria (FR), Temperatura (Temp °C), Saturación de oxígeno (SpO<sub>2</sub>), Carboxihemoglobina (SpCO) y la Metahemoglobina (SpMet).

### **6.2 Medidas preventivas y de control implementadas**

En el apartado 1.3, de descripción del entorno de trabajo, se especifican diferentes medidas de seguridad y de control implementadas en los trabajos de mantenimiento, inspección y reparación de la tuneladora en condiciones hiperbáricas.

Se utilizaron las tablas de descompresión con aire y con oxígeno definidas en el decreto alemán del 4 de octubre de 1972 sobre trabajos en aire comprimido en la versión actualizada del 19 de junio de 1997

Estas tablas fueron redactadas por la TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft (Asociación de Seguros Legales de Accidentes de Alemania) conforme al siguiente marco legal:

- Artículo 18 de la ley de seguridad y protección en el trabajo (Arbeitsschutzgesetz) del 7 de agosto de 1996 (boletín federal de trabajo I, página 1246).

- Artículo 8 párrafo 1 de la ley de horas de trabajo del 6 de junio de 1994 (Arbeitszeitgesetz) (boletín federal de trabajo I, página 1170).

Este decreto, elaborado para trabajos con aire comprimido, no es válido para trabajos en campanas de buceo sin esclusas ni para trabajos de buceo (submarinismo).

### 6.2.1 Procedimientos específicos de intervención en emergencias

Fueron adecuados diferentes algoritmos de toma de decisiones para el entorno de la tuneladora (ver anexos):

- Algoritmo de Soporte Vital Avanzado (SVA)
- Algoritmo de Paciente Traumático Grave / Soporte Vital Avanzado en Trauma
- Algoritmo de Atención Inicial a quemados y víctimas de incendio
- Abordaje y tratamiento del paciente disbárico

Por otro lado, se elaboraron diferentes procedimientos específicos de actuación en caso de accidente (ver anexos...) que se concretaron en:

- **Procedimiento de actuación ante un Incidente intracámara**

1. INSTALSUB. Será el encargado de llevar a cabo las técnicas de inmovilización de extremidades y control cervical bimanual y/o colocación de collarín cervical. Así mismo será el responsable de dirigir y llevar a cabo las técnicas de rescate de la víctima y transporte de la cabeza de la tuneladora hasta la cámara hiperbárica.

2. IEM. Accede a la cabeza de la tuneladora a petición del jefe de grupo o responsable de la intervención. IEM colabora con INSTALSUB en el rescate de la víctima y efectúa revaloración del paciente. Dirige movilización e inmovilización y efectúa, si procede tratamiento específico del dolor según protocolo.

3. DECO VÍCTIMA Se realizará siempre siguiendo las tablas de descompresión indicadas por el camarista según tiempo de exposición en medio hiperbárico siempre que no exista contraindicación médica a criterio del equipo IEM

4. DECO IEM. Siempre según el criterio del jefe de intervención y del camarista, se procederá a un tiempo de descompresión del personal del IEM, conjuntamente con la víctima, siempre que no exista contraindicación médica según criterio del equipo IEM

5. EVACUACIÓN. Siempre según el criterio del equipo IEM, y consultado INSTALSUB, se planteará la evacuación con DECO o sin ella en función del estado hemodinámico, o

su esperada evolución, de la víctima. La derivación y tipo de transporte se realizará siempre a criterio del personal de IEM en función del estado de la víctima, de su patología básica y del centro sanitario de referencia respectivo.

- **Procedimiento de actuación ante un Incidente extracámara**

1. ALERTA. Cualquier situación de emergencia, en el supuesto de la presencia de víctimas, se comunicará de inmediato al personal de intervención sanitaria del IEM que procederá a actuar y dirigir según protocolos propios.

2. EVACUACIÓN. Siempre según el criterio del equipo IEM, y consultado INSTALSUB, se planteará la evacuación con tratamiento hiperbárico o sin el, en función del estado hemodinámico, o de la esperada evolución de la víctima.

La derivación y tipo de transporte se realizará siempre a criterio del personal de IEM en función del estado de la víctima, de su patología básica y del centro sanitario de referencia respectivo.

### 6.2.2 Simulacros

Se realizaron diversos simulacros con la participación activa de los buceadores, del personal de la obra y del servicio preventivo.



Extracción de un accidentado del interior de la cámara hiperbárica en un simulacro. Foto IEM

## 6.3 Determinación de variables de estudio

### 6.3.1 Parámetros fisiopatológicos estudiados

Los parámetros fisiológicos estudiados fueron:

- Frecuencia cardíaca (FC)
- Presión arterial (PA)
- Frecuencia respiratoria (FR)
- Temperatura (Temp °C)
- Saturación de oxígeno (SpO<sub>2</sub>)
- Carboxihemoglobina (SpCO)

Todas las determinaciones fueron realizadas en las mejores condiciones de reposo posibles en este ámbito, en el espacio previo del acceso a la cámara hiperbárica, tanto a la entrada como a la salida de ésta y por personal sanitario especializado: enfermería, técnicos de transporte sanitario (TTS) o técnicos de emergencias sanitarias (TES) con la supervisión de personal médico *in situ*.

La exposición al medio hiperbárico conlleva importantes cambios en la respuesta funcional del organismo. Uno de los cambios más relevantes observados, en humanos, es la disminución de la Frecuencia Cardíaca (FC). La bradicardia del ambiente hiperbárico (hasta 4 ATA) es una respuesta multifactorial básicamente vinculada al aumento de la Pp O<sub>2</sub>, y está mediada por un aumento de la participación parasimpática en la modulación cardíaca.

### 6.3.2 Método de control de los parámetros definidos

PARÁMETRO FISIOPATOLÓGICO	MÉTODO DE CONTROL
Frecuencia cardiaca (FC)	OMRON R7 y RAD-57TM
Presión arterial sistólica (PAS)	OMRON R7
Presión arterial diastólica (PAD)	OMRON R7
Frecuencia respiratoria (FR)	Manual
Saturación de oxígeno (SpO <sub>2</sub> )	RAD-57TM
Carboxihemoglobina (COHb)	RAD-57TM
Metahemoglobinemia (MetHb)	RAD-57TM
Edad	Ficha laboral
Temperatura (T °C)	Balance Art. 2738

Todos los parámetros fisiopatológicos se controlaran en el momento de la entrada y la salida de la tuneladora a todos los participantes del estudio.

### 6.3.3 Material electromédico utilizado en el control de los parámetros definidos

#### 6.3.3.1 Monitor automático de la presión arterial OMRON R7

El OMRON R7 es un aparato compacto totalmente automático que sirve para medir la presión arterial. Basándose en el principio oscilométrico, mide la presión arterial y las pulsaciones de manera cómoda y rápida a través de la muñeca. Incorpora un sistema inteligente para el inflado controlado «que no puede verse», conocido como «*intellisense*». Se trata de un método avanzado de medición oscilométrica. No es necesario volver a ajustar el aparato para inflar de nuevo.



Dispone de un sensor de postura. Este sensor puede determinar la altura óptima de la muñeca (a la altura del corazón) en el momento de realizar la medición de la presión arterial. Medir a la misma altura del corazón es extremadamente importante, puesto que una posición más alta o más baja comportaría resultados erróneos.

### Especificaciones

- **Nombre:** OMRON Aparato automático para medir la presión arterial.
- **Modelo:** R7
- **Pantalla:** pantalla de cristal líquido (LCD) con matriz de puntos.
- **Mediciones:** método oscilométrico.
- **Gama de medición:**
  - **Presión:** 0 a 299 mm Hg.
  - **Pulsaciones:** de 40 a 180 por minuto.
- **Precisión:**
  - **Presión:** entre  $\pm 3$  mm Hg.
  - **Pulsaciones:** entre  $\pm 5\%$  de la lectura.
- **Inflado:** inflado automático mediante una bomba.
- **Desinflado:** desinflado automático instantáneo.
- **Detección de la presión:** sensor de presión con semiconductor de Capacidad electrostática.
- **Suministro de energía eléctrica:** dos pilas alcalinas LR03 (AAA).
- **Duración de las pilas:** si se utilizan pilas alcalinas, la duración puede llegar a las 300 mediciones (siempre que el aparato se utilice tres veces al día inflándolo hasta 170 mm Hg con una temperatura ambiente de 22°C).
- **Temperatura y humedad de funcionamiento:** + 10°C a + 40°C; entre el 30% y el 85% de humedad relativa.
- **Temperatura y humedad de almacenamiento:** - 20°C a + 60°C; entre el 10% y el 95% de humedad relativa.
- **Circunferencia de la muñeca:** entre 135 mm y 215 mm.
- **Peso del elemento principal:** aproximadamente 150 g (sin pilas).
- **Dimensiones externas:** 78 x 65,5 x 37,3 mm (ancho x alto x profundidad). No se incluye la muñequera.
- **Protección contra descargas eléctricas:** dispositivo interno de suministro eléctrico tipo B.
- **Accesorios:** dos pilas alcalinas LR03 para la detección, estuche para guardarlo, manual de instrucciones, ficha de mediciones, tarjeta de garantía.
- **Fabricante:** OMRON HEALTHCARE CO., LTD.

Este dispositivo cumple las cláusulas de la directiva CE 93/42/CEE (Directiva sobre dispositivos médicos) y está diseñado de acuerdo con el estándar europeo EN1060, Esfigmomanómetros no invasivos, Parte 1: Requisitos generales y Parte 3: requisitos adicionales para sistemas electromecánicos de medición de la presión arterial.

### **Presión arterial en el brazo y en la muñeca**

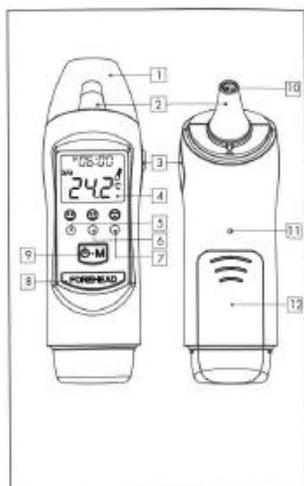
La presión arterial se mide normalmente en la arteria braquial. Los valores de la presión arterial medidos en la muñeca son muy parecidos a los braquiales y reflejan los cambios de la presión sanguínea braquial. No obstante, en caso de que existiera un trastorno de la circulación, como puede ser la obstrucción arterial, se observarían diferencias sustanciales entre los valores de la presión arterial medidos en la muñeca o en el brazo.

#### **6.3.3.2 Termómetro de frente y oído MOD. 2738**

Se realizaron todas las mediciones en la sien.

El funcionamiento del aparato se basa en la técnica de infrarrojos y mide, sin contacto, la radiación térmica del tímpano en el oído o en la sien.

El oído es un lugar apropiado para la medicación de la temperatura corporal. Las mediciones realizadas en la frente o en la sien se convierten a la temperatura corporal medida.



Termómetro de frente y oído MOD. 2738

Ambos puntos de medición se encuentran cerca del centro de control de temperatura del cerebro y ofrecen casi de forma instantánea y exacta el valor de temperatura del cuerpo. La temperatura ambiente se compensa automáticamente durante su medición.

Los procedimientos de mediación son muy seguros. Sin embargo, hay que tener en cuenta lo siguiente para obtener unos resultados exactos:

- El cabezal medidor debe estar siempre limpio y ordenado/ dispuesto de tal manera que la radiación infrarroja también alcance el cabezal medidor
- El aparato deber haber registrado la temperatura ambiente.
- Durante la medición evite mantener el termostato en la mano durante mucho tiempo, para no afectar al resultado de la medición.

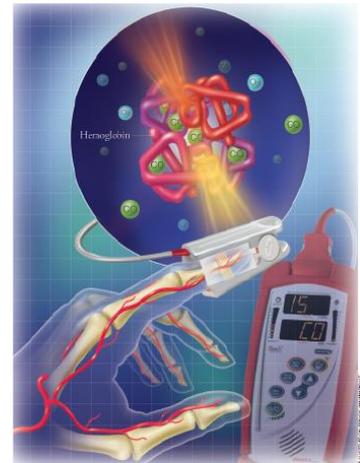
### Datos técnicos

- **Descripción:** termómetro de frente y oído.
- **Número de modelo:** Art. 2738.
- **Protección contra descaga eléctrica:** modelo conforme tipo BF.
- **Sistema de visualización:** pantalla LCD digital 4.
- **Procedimiento de medición:** infrarrojos sin contacto.
- **Suministro eléctrico:** pila de litio 3 V 225 mAh CR2032.
- **Rango de medición:**
  - Temperatura ambiente, así como fecha y hora en la que el aparato no está en funcionamiento.
  - Modo temperatura en la sien / frente entre 34 °C y 42,2 °C (entre 93,2 °F y 108.0 °F) con función de semáforo:
    - Diodo LED verde entre 34 °C y 37,4 °C
    - Diodo LED amarillo entre 37,5 °C y 37,9 °C
    - Diodo LED rojo > 38 °C
- Rango de medición de cronómetro desde 0,01 seg. hasta 3 min
- **Exactitud:**
  - Frente:  $\pm 0,2$  °C ( $\pm 0,4$  °F) en rango 36 -39 °C (96,8– 102 °F)
  - Hogar:  $\pm 0,3$  °C ( $\pm 0,5$  °F) en rango 22 -42,2 °C (71,6– 108 °F)
  - Habitación:  $\pm 2$  °C ( $\pm 4$  °F) en rango 10 -40 °C (50– 104 °F)
- **Memorizador:** 9 mediciones
- **Conmutación:** temperatura: °C en °F y °F en °C.
- **Desconexión automática:** después de un minuto sin utilizar para la protección de la pila, se continúa mostrando la temperatura ambiente así como la fecha y la hora.
- **Temperatura ambiente:** +10 °C hasta +40 °C (50 °F hasta 104 °F)
- **Temperatura almacén:** -20 °C hasta +50 °C (-4 °F hasta 122 °F)

- Evitar en cualquier caso  $T > 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $158\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) (Humedad relativa  $< 0,85$ )!

### 6.3.3.3 Pulsí co-oxímetro masimo rad-57tm

Utilizado por los servicios de emergencias prehospitalarias para el *triage* en segundos de afectados por monóxido de carbono (CO) en incendios y otros incidentes relacionados con el CO en el lugar del siniestro



## Funcionamiento y especificaciones

### Funcionamiento

Mide por infrarrojos los siguientes parámetros:

- El % de O<sub>2</sub> ligado a la Hb a nivel capilar
- El % de CO a nivel capilar
- El % de Metahemoglobina a nivel capilar
- Frecuencia cardíaca

### Rango de medición

- Saturación de oxígeno (SpO<sub>2</sub>): 0% - 100%
- Carboxihemoglobina (SpCO): 0% - 99%
- Metahemoglobina (SpMet): 0-99,9%
- Frecuencia de pulso: 25-240 (lpm)
- Índice de perfusión: 0,02-20%

### **Precisión de la saturación de oxígeno arterial**

- Saturación\*: 60% a 80%
- Sin movimiento
- Pacientes adultos, lactantes y pediátricos:  $\pm 3\%$
- Saturación: 70% a 100%
- Sin movimiento
- Pacientes adultos, lactantes y pediátricos:  $\pm 2\%$
- Neonatos:  $\pm 3\%$
- Movimiento
- Pacientes adultos, lactantes, pediátricos y neonatos:  $\pm 3\%$
- Perfusión baja
- Pacientes adultos, lactantes, pediátricos y neonatos:  $\pm 2\%$

### **Precisión de saturación de la carboxihemoglobina (%SpCO)**

- SpCO®: 1% - 40%  $\pm 3\%$

### **Precisión de la saturación de la metahemoglobina (%SpMet)**

- SpMet®: 1% - 15%  $\pm 1\%$

### **Precisión de la frecuencia de pulso**

- Frecuencia de pulso: 25-240 lpm
- Sin movimiento: pacientes adultos, lactantes, pediátricos y neonatos  $\pm 3$  lpm
- Con Movimiento: pacientes adultos, lactantes, pediátricos y neonatos  $\pm 5$  lpm
- Perfusión baja: pacientes adultos, lactantes, pediátricos y neonatos  $\pm 3$  lpm

### **Resolución**

- Saturación de oxígeno (%SpO<sub>2</sub>): 1%
- Frecuencia de pulso (lpm) 1 lpm
- Saturación de la carboxihemoglobina (%SpCO)  
Pantalla numérica: 1%
- Saturación de la metahemoglobina (%SpMet)  
Pantalla numérica: 0,1%

## **ESPECIFICACIONES**

### **Baterías**

- Tipo: 4 alcalinas AA
- Capacidad: hasta 10 horas

### **Ambientales**

- Temperatura de funcionamiento: 0 °F a 129 °F (-18 °C a 54 °C)
- Temperatura de almacenamiento: -40 °F a 158 °F (-40 °C a +70 °C)
- Humedad de funcionamiento: 5% a 95%, sin condensación
- Altitud de funcionamiento: presión de 500 mbar a 1060 mbar, -1.000 pies a 18.000 pies (-304 m a 5.486 m)
- La duración real de las baterías se reducirá si utiliza el instrumento a menos de 5 °F (-15 °C), debido a la tecnología de las baterías alcalinas.

### **Dimensiones**

- Dispositivo portátil: 6,2" x 3,0" x 1,4" (15,8 cm x 7,6 cm x 3,6 cm)

### **Peso**

- Dispositivo portátil: 13 onzas (0,37 kg)

### **Análisis de tendencias**

- Brinda 72 horas de análisis de tendencias a una resolución de 2 segundos de SpO<sub>2</sub>, SpCO, SpMet, frecuencia de pulso, índice de perfusión y PVI. Salida a PC que ejecute el software utilitario Masimo TrendCom™.

### **Modos de SpO<sub>2</sub>**

- Modo de promediación: 2, 4, 8, 10, 12, 14 ó 16 segundos
- Sensibilidad: APOD, Normal y Max
- FastSat®: Activado/desactivado

## **Alarmas**

- Alarmas audibles y visuales para saturación alta o baja y frecuencia de pulso (SpO<sub>2</sub> de 1% a 99%, SpCO de 1% a 98%, SpMet de 1% a 99,5%, PI de 0,03% a 19%, PVI de 1% a 99% y frecuencia de pulso de 30 a 235 lpm)

## **Pantalla/indicadores**

- Datos que se muestran: %SpO<sub>2</sub>, %SpCO, %SpMet, barra SIQ, barra PI, frecuencia de pulso, índice de perfusión (PI), índice de volumen del paciente, baja señal Signal IQ, estado de alarma, estado de alarma en silencio y estado de las baterías.
- Tipo: LED

## **Cumplimiento**

- Cumplimiento de EMC: EN60601-1-2, Clase B
- Clasificación del equipo: IEC 60601-1
- Grado de protección: Tipo BF, parte aplicada

## **Claves para la determinación correcta de SpCO® y/o SpMet® en el estudio**

El equipo Masimo Rad-57 es un Pulsí CO-Oxímetro™, no un equipo convencional de Saturación. Utiliza más de 7 longitudes de onda de luz para medir de manera continua y no invasiva los niveles en sangre de Carboxihemoglobina (SpCO) y/o Metahemoglobina (SpMet), junto con SpO<sub>2</sub> y Frecuencia Cardíaca. Al ser un equipo más complejo y avanzado que un pulsioxímetro convencional, las medidas de SpCO Y SpMet son más sensibles a la correcta aplicación del sensor y a la luz ambiental.

### **Aplicación del Sensor:**

Para conseguir lecturas de SpCO y SpMet más precisas, se debían seguir los siguientes pasos:

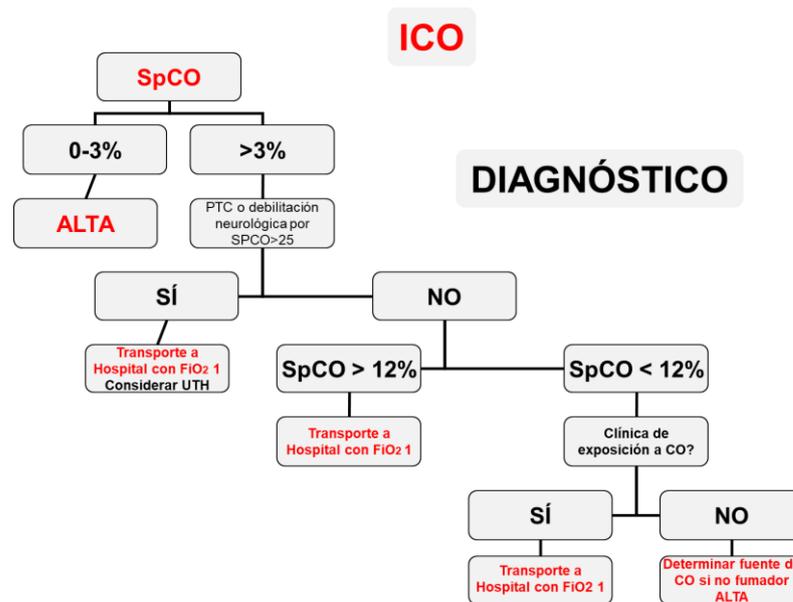
1. Selección del dedo indicado para el sensor, primero el anular, después el corazón y finalmente el índice.
2. Inserción del dedo hasta que la punta toque el tope al final del sensor.
3. Asegurar que el emisor está situado en la parte superior del dedo. Si es así, el cable descansará en el dorso de la mano.
4. Proteger el sensor de la luz brillante especialmente luz estroboscópica o solar

### Criterios de buenas prácticas con el equipo MASIMO RAD-57tm:

1. Confirmar siempre lecturas altas de SpCO tomando al menos 3 determinaciones en 3 dedos diferentes. Usar el promedio de las 3 lecturas como valor medido de SpCO al paciente.
2. Mantener la mano y el sensor tan quietos como sea posible mientras el equipo Rad-57 esté obteniendo lectura de SpCO.

### Precauciones con el equipo MASIMO RAD-57TM:

1. Valores elevados de Metahemoglobina (MetHb) pueden causar lecturas falsamente elevadas de SpCO.
2. En caso de usar sensor adulto en paciente con dedos muy finos, la luz puede pasar alrededor de los finos dedos y provocar falsas elevadas lecturas de SpCO.



Algoritmo IEM de toma de decisiones en la determinación de CO y de MetHb con un cooxímetro

#### **6.4 Análisis estadístico**

De todas las variables se hace la descripción univariada. En las variables continuas se describen los parámetros de centralidad i dispersión.

La evolución de datos se efectuó mediante la prueba T de *Student* de medias de muestras dependientes. Previamente, para determinar el valor de su significancia estadística se supusieron varianzas iguales o distintas según la prueba de *Levene* para la igualdad de varianzas.

Se considera nivel de significación estadística cuando  $p < 0,05$

Se ha utilizado en todo caso el programa *IBM SPSS Statistics* - versión 21 para el análisis estadístico.

## 7. RESULTADOS

A partir de cada uno de los objetivos específicos (que son 4) presentamos los resultados dando respuesta a dichos objetivos:

### 7.1 Descripción de la muestra

**Número de trabajadores.** Como se especifica en la tabla 1 son 90 de los que 30 son control y representan el 33 %

<b>Tabla 1.</b> Distribución de frecuencias: Participantes por grupos normobárico e hiperbárico			
<b>Participantes</b>	<b>Control (normobárico)</b>	<b>Caso (hiperbárico)</b>	<b>Total</b>
<b>Frecuencia absoluta</b>	30	60	<b>90</b>
<b>Porcentaje (%)</b>	33,3	66,7	<b>100</b>

#### **Descripción de la edad.**

El grupo control tiene una media de edad de 38,5 años con una desviación estándar (DE) de 7,3 años, con un mínimo de 26 y un máximo de 54.

El grupo de trabajo hiperbárico tiene una media de edad de 32,3 años y una DE de 6,7 años, con un mínimo de 21 y un máximo de 51.

La diferencia de 6,2 años entre los trabajadores es significativa con  $p < 0,001$ .

#### **Número de entradas**

El grupo control ha efectuado 98 entradas, con una media de 3,2 y una DE de 2,8.

Mientras que el grupo hiperbárico tiene 366 entradas con una media de 6,1 y una DE de 4,6.

La diferencia de media de entradas por trabajador es significativa con  $p < 0,05$ .

#### **Tiempo en el fondo (a presión)**

El tiempo en el fondo (TF) del personal a presión es de una media de 147 minutos y una DE 35,3.

En los trabajadores normobáricos el TF es de 189 minutos y una DE de 93.

### Tiempo de descompresión

Tiene una media de 18 minutos con una DE de 6,4 minutos habiendo realizado un número de paradas de media 185 y de 0,6 minutos

### Presión relativa

Los trabajadores hiperbáricos han trabajado a una presión relativa media de 1,1 bars con una DE de 0,25 bars.

## 7.2 Condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo) según el número de paradas de descompresión realizadas del grupo hiperbárico.

En la tabla 2 se describen las características de las intervenciones en el grupo hiperbárico

<b>Tabla 2 grupo hiperbárico.</b> Condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo) según el número de paradas de descompresión realizadas.						
Características de las intervenciones	Presión máxima (Bars)			Duración (minutos)		
	N	Media	Desv. Est	N	Media	Desv. Est
<b>Sin parada</b>	70	0.9	0.2	67	138	47
<b>Con 1 parada</b>	105	0.8*	0.2	99	154**	44
<b>Con 2 paradas</b>	182	1.2	0.2	174	171	20
<b>Con 3 paradas</b>	16	1.3	0.1	16	163	19
<b>Total</b>	373	1.1	0.2	356	160	36

(\*) La presión máxima de trabajo no es superior en las intervenciones con una parada respecto a las descompresiones sin parada. Las tablas consideran los dos factores (tiempo y presión) para indicación de paradas, y el tiempo (\*\*) es claramente superior en los que realizan una parada.

### 7.3 Comparación de las condiciones fisiológicas de los trabajadores antes y después de la intervención hiperbárica

En la tabla 3 se describen las características asociadas a la función cardíaca.

<b>Tabla 3.</b> Características descriptivas de las condiciones fisiopatológicas de funciones cardíacas (TA y FC) por grupos												
Función cardíaca	Control (normobárico)					Caso (hiperbárico)					Diferencias medias	
	N	Media	DE	Min	Max	N	Media	DE	Min	Max	Diferencias	P
<b>TAS entrada (mmHg)</b>	30	134,6	11,6	115	158	54	136,1	10,0	115	64	-1,5	0,531
<b>TAS salida (mmHg)</b>	28	133,5	11,3	108	154	53	134,6	11,9	98	162	-1,0	0,702
<b>TAD entrada (mmHg)</b>	30	82,3	7,9	65	97	54	86,9	7,3	73	99	-4,5	<b>0,010</b>
<b>TAD salida (mmHg)</b>	28	83,2	7,9	64	97	53	85,4	7,3	69	99	-2,2	0,219
<b>FC entrada (ppm)</b>	30	83,0	10,2	58	103	54	86,1	11,9	64	119	-3,1	0,230
<b>FC salida (ppm)</b>	28	84,1	10,5	59	109	53	82,4	12,2	62	115	1,7	0,543

Como puede observarse solo existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre el grupo normobárico y el hiperbárico en la TAD a la entrada, pero no a la salida.

En la tabla 4 se efectúa la misma descripción para los parámetros de función respiratoria

<b>Tabla 4.</b> Características descriptivas de las condiciones fisiopatológicas de parámetros asociados a la función respiratoria (FR, SpO <sub>2</sub> , COHb, MetHb), por grupos												
Función respiratoria	Control (normobárico)					Caso (hiperbárico)					Diferencias medias	
	N	Media	DE	Min	Max	N	Media	DE	Min	Max	Diferencias	P
FR entrada (rpm)	27	16,7	2,2	13	20	54	16,1	1,6	12	22	0,7	0,180
FR salida (rpm)	25	17,1	2,0	14	21	53	15,7	1,5	12	20	1,4	<b>0,004</b>
SpO <sub>2</sub> entrada (%)	30	98,3	0,8	97	100	54	97,4	0,9	95	99	0,9	<b>0,000</b>
SpO <sub>2</sub> salida (%)	27	98,0	1,2	94	100	53	96,8	0,8	95	98	1,2	<b>0,000</b>
COHb entrada (%)	9	5,6	1,2	3	8	54	3,3	2,2	0	10	2,3	<b>0,003</b>
COHb salida (%)	9	3,3	1,1	1	5	53	2,3	1,9	0	10	1,1	0,101
MetHb entrada (%)	6	3,7	1,6	1,0	5,0	54	0,8	0,2	0,2	1,1	2,9	<b>0,007</b>
MetHb salida (%)	4	2,9	1,8	0,5	5,0	53	0,7	0,2	0,0	1,1	2,2	0,098

<b>Tabla 5.</b> Resumen de las características descriptivas de las condiciones fisiopatológicas por grupos en cuanto a los parámetros de edad y temperatura												
Otros parámetros	Control (normobárico)					Caso (hiperbárico)					Diferencias medias	
	N	Media	DE	Min	Max	N	Media	DE	Min	Max	Diferencias	P
Edad (años)	30	38,5	7,3	26	54	56	32,3	6,7	21	51	6,2	<b>0,000</b>
Temp entrada (°C)	27	36,0	0,4	35,3	36,8	54	36,0	0,4	34,7	36,7	0,0	0,993
Temp salida (°C)	25	36,1	0,4	35,0	36,7	53	36,0	0,3	35,0	36,5	0,2	0,063

#### 7.4 Descripción de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiológicas del grupo de estudio y el grupo control

**Tabla 6.** Comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas, vinculadas a la función cardíaca, antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico

Función cardíaca (entrada – salida)	Variación control (normobárico)			Variación caso (hiperbárico)			Diferencias medias	
	N	Media	DE	N	Media	DE	Diferencias	P
TAS (mmHg)	28	1,8	13,1	53	1,1	12,6	0,7	0,815
TAD (mmHg)	28	-0,3	8,1	53	1,3	7,6	-1,7	0,352
FC (ppm)	28	-0,9	10,7	53	3,6	11,4	-4,5	0,088

**Tabla 7.** Comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas, vinculadas a la función respiratoria, antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico

Función respiratoria (entrada – salida)	Variación control (normobárico)			Variación caso (hiperbárico)			Diferencias medias	
	N	Media	DE	N	Media	DE	Diferencias	P
FR (rpm)	25	-0,4	2,1	53	0,3	1,1	-0,7	0,152
SpO <sub>2</sub> (%)	27	0,3	1,1	53	0,69	1,2	-0,4	0,182
COHb (%)	9	2,3	2,3	53	1,1	1,8	1,2	0,100
MetHb entrada (%)	4	0,1	0,2	53	0,1	0,1	0,0	0,843

**Tabla 8.** Comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas, vinculadas a la temperatura, antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico

Otros parámetros (entrada – salida)	Variación control (normobárico)			Variación caso (hiperbárico)			Diferencias medias	
	N	Media	DE	N	Media	DE	Diferencias	P
Temp (°C)	25	-0,1	0,5	53	-0,3	1,8	0,2	0,612

### 7.5 Generar una guía de prevención y seguridad para los trabajos en tuneladoras EPBs

Las medidas preventivas y de seguridad tomadas antes y durante la intervención fueron testadas y discutidas así como los algoritmos de toma de decisiones en situaciones de emergencia, como se comentó anteriormente.

En el apartado anexos se relacionan con detalle.

## 8. DISCUSIÓN

En algunos casos los observadores apuntan presiones que no corresponden exactamente con las descritas o pautadas en las guías o procedimientos descritos en las tablas de referencia. Estas diferencias son habituales en la práctica diaria de estos profesionales y no comportaron ninguna consecuencia a destacar.

### 8.1 Sobre la muestra

#### **Número de trabajadores.**

Como se especifica en la tabla 1 la muestra son 90 trabajadores de los que 30 son control, y representan el 33%.

La tipología de este estudio no permite hacer un muestreo poblacional, razón por la cual se escogió una muestra de conveniencia.

La muestra se considera suficientemente amplia como para obtener resultados aptos en el presente estudio

#### **Sobre la edad.**

Todo y que la diferencia de 6,2 años entre los trabajadores es significativa con una  $p < 0,001$ , se considera estadísticamente irrelevante para este trabajo desde un punto de vista fisiológico.

#### **Sobre el número de entradas**

La diferencia de media de entradas por trabajador es significativa con una  $p < 0,05$ .

El hecho de que el grupo control haya efectuado solo 98 entradas, una cifra muy inferior a la del grupo de estudio o hiperbárico, con 366 entradas, se debe a las condiciones del terreno excavado que muy mayoritariamente precisaba de intervención en ambiente hiperbárico.

#### **Sobre el tiempo en el fondo (a presión)**

La diferencia existente del tiempo en el fondo (TF) del personal a presión, de 147 minutos de media, con la del personal de control o normobárico, de 189 minutos de media, viene dada por las limitaciones que el marco legal de seguridad en trabajos hiperbáricos no permite superar los 180 minutos. Requerimiento legal que se cumplió al 100 %.

## **Sobre el tiempo de descompresión**

Los datos de tiempos obtenidos se encuentran dentro de la normalidad según las tablas de descompresión utilizadas

## **Sobre la presión relativa**

Los trabajadores hiperbáricos han trabajado a una presión relativa media de 1,1 bars que corresponde a una presión absoluta de 2,1 bars o 2,1 atmósferas aproximadamente

## **8.2 Condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo) según el número de paradas de descompresión realizadas del grupo hiperbárico.**

**En la tabla 2**, Grupo hiperbárico: condiciones de trabajo de las intervenciones (tiempo y presión máxima de trabajo), según el número de paradas de descompresión realizadas, en las intervenciones con una parada, se observa que la presión máxima de trabajo no es superior en las intervenciones con una parada (\*) respecto a las descompresiones sin parada.

Esto puede ser debido, por un lado, a que algunos camaristas y jefes de equipo decidían conjuntamente realizar una parada por prevención, aunque las tablas no indican realizar una parada de descompresión para esas condiciones de trabajo. Una práctica habitual en el mundo del buceo deportivo y profesional.

Por otro lado, las tablas consideran los dos factores (tiempo y presión) para indicación de paradas, y el tiempo (\*\*) es claramente superior en los que realizan una parada.

### 8.3 Comparación de las condiciones fisiológicas de los trabajadores antes y después de la intervención hiperbárica

**En la tabla 3**, donde se describen las características asociadas a la función cardíaca, se puede observar que solo existen diferencias significativas entre el grupo normobárico e hiperbárica en la presión arterial diastólica (PAD) a la entrada, pero no a la salida.

Estas diferencias se pueden atribuir a un error alfa de un 5 % que podemos considerar totalmente aleatorio ya que por el número de contrastes efectuados el riesgo de obtener alguna significación espúrea es del 53 %.

Por lo tanto, no se aprecian diferencias desde un punto de normalidad fisiológica en los parámetros valorados, FC y PA, entre los 2 grupos, normobáricos e hiperbáricos, ni tampoco entre la entrada y la salida.

**En la tabla 4**, sobre las características descriptivas de las condiciones fisiopatológicas asociadas a la función respiratoria por grupos, se observa que la diferencia de las medias es estadísticamente significativa en varios parámetros.

Estas diferencias muestran, en general, una mejor función respiratoria. Mejora, que no implica ninguna consecuencia clínica inmediata, y que se puede atribuir al procedimiento de descompresión pautado en el que los buceadores (trabajadores hiperbáricos). En los períodos de descompresión con O<sub>2</sub>, descansan y se relajan mientras respiran con ayuda de una máscara de administración de O<sub>2</sub>.

Las medias de los parámetros de COHB y MetHb, tanto a la entrada como a la salida, son menores en los buceadores, o trabajadores hiperbáricos, respecto a trabajadores mecánicos de la construcción, o trabajadores normobáricos. La exigencia legal de una preparación físico médica previa con control anual de una revisión médica específica obligatoria podría justificar esta diferencia.

**En la tabla 5**, de resumen de las características descriptivas de las condiciones fisiopatológicas por grupos en cuanto a los parámetros de edad y temperatura, el único estadísticamente significativo es el de la edad que no comporta ninguna traducción clínica.

#### 8.4 Descripción de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiológicas del grupo de estudio y el grupo control

En la **tabla 6**, de comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas de la función cardíaca, antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico, no se observa ningún parámetro estadísticamente significativo.

En la **tabla 7** de comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas de la función respiratoria antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico, se observa:

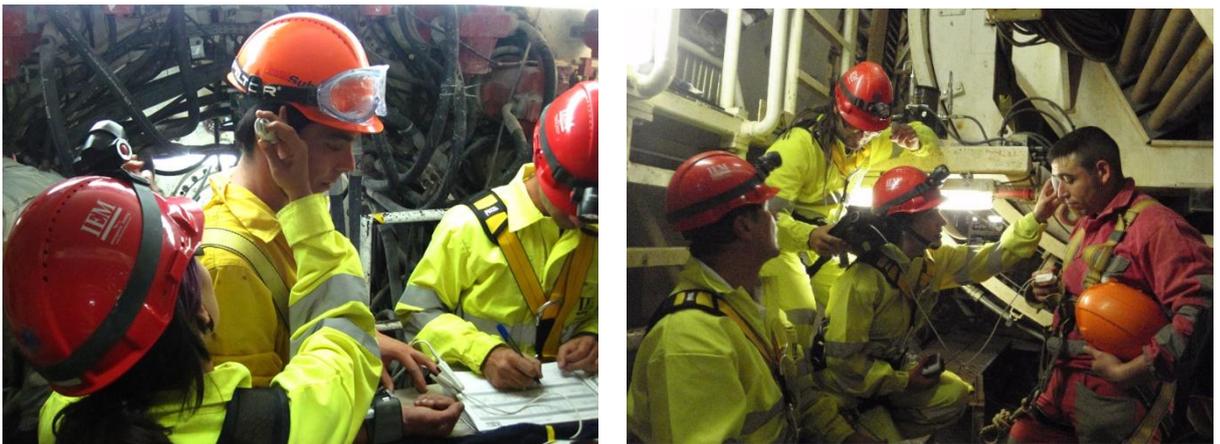
- Que no existen en general diferencias fisiológicas significativas.
- Que la diferencia media de la FR (-0,7) no es ni estadística ni fisiológicamente significativa.
- Que la diferencia en la media del COHb no es ni estadística ni fisiológicamente significativa.
- Que la media de la MetHb de entrada, en ambos grupos es la misma. Se podría atribuir a la necesidad de más tiempo de evolución la alteración inducida por el CO en la Hb para convertirla en MetHb.

En la **tabla 8**, de comparación de las variaciones interindividuales de las condiciones fisiopatológicas de temperatura, antes y después de la intervención, por grupos normobárico e hiperbárico, no se observa ningún parámetro estadísticamente significativo. A destacar la cifra de 0,2, que responde a la fórmula diferencia = control – caso, que es la diferencia de las variaciones individuales entre el grupo control y el hiperbárico. La diferencia en la media del no es ni estadística ni fisiológicamente significativa.

## 9. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

- **Pérdida de datos justificada por:**
  - Lugar de trabajo de difícil acceso. Lugar confinado
  - Gran rotación del personal del que se tienen datos.
- **Dificultad en el control de calidad de los datos obtenidos a pie de tuneladora:**

Se llevó a cabo un control de calidad de algunos datos con posterioridad al contrastar los obtenidos por el jefe de equipo de buceadores y por el camarista, ambos de la empresa InstalSub, con los obtenidos por el personal del IEM. Por imperativo legal toda actuación hiperbárica requiere la cumplimentación de una hoja de intervención donde se detallan personal interviniente, horas, presiones, gases utilizados, etc.



Control médico de buceadorES previo a una intervención a presión en la plataforma de acceso a la cámara hiperbárica. Foto IEM

- La toma de datos no coincide con el protocolo a seguir, las tablas:
  - Se describen las presiones relativas leídas por los observadores durante las paradas que no coinciden siempre con las “estándar / pautadas” que son, en el caso de 2 paradas, 1 bar la 1ª y 0,5 bares la 2ª.
  - Según tablas / protocolos utilizados no hay parada a 0,5 bar sino hay previamente parada a 1 bar
- Los observadores apuntaron otras presiones que no son las descritas en la tabla 4 de distribución de frecuencias de las descompresiones por parada y presión
- Falta de estudios previos

## **10. CONCLUSIONES**

### **10.1 Conclusiones según los Objetivos específicos**

- Todos los trabajadores hiperbáricos presentaron unas condiciones fisiológicas adecuadas previas a la intervención. El papel del control médico de aptitud para el buceo previo y el control médico ejercido por el personal sanitario a pie de tuneladora, previo a la intervención hiperbárica, demostró ser eficiente.
- A la salida de la intervención hiperbárica presentaron todos los buceadores un perfil fisiológico de normalidad.
- No se encontraron diferencias, ni estadísticas ni fisiológicas, significativas entre grupo y control en ninguno de los parámetros estudiados.

### **10.2 Conclusiones según los objetivos generales**

La falta de accidentes y/o incidentes mínimamente destacables permiten concluir que el conjunto de medidas preventivas propuestas e implementadas por el IEM, con el soporte de empresas del buceo profesional y de los servicios preventivos de la UTE Túnel Sabadell, fueron acertadas.

Y, para finalizar, es preciso insistir hasta la saciedad que:

- La respuesta en urgencias y emergencias, y evidentemente en las tuneladoras EPBs, requiere de personal altamente cualificado y preparado para trabajar de forma integral y coordinada con el resto de cuerpos operativos.
- La prevención, la seguridad y una respuesta eficiente en emergencias es responsabilidad de todos.

## 11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de la experiencia obtenida en el planteamiento y elaboración de la presente tesis doctoral, con las limitaciones que comporta un entorno complejo y de riesgo como el mencionado, creo que se abren nuevas líneas y propuesta de investigación:

- La utilización de nuevas tecnologías en la monitorización de este tipo de trabajadores que permita mejorar la toma de datos.
- Poder realizar un estudio similar con presiones superiores que comporten la utilización de mezcla de gases en lugar de aire comprimido.
- Valorar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas en los niveles de saturación de gases entre trabajadores hiperbáricos en tuneladoras y buceadores profesionales en entorno acuático.

## 12. GLOSARIO

**Accidente disbárico:** Lesión originada por la actividad humana en medios ambientales líquidos o gaseosos sometidos a presión ambiental diferente a la atmosférica. Riesgo profesional u ocupacional del buceo o la aviación.

**Alteración:** Cualquier cambio en la composición mineralógica de una roca debido a procesos físicos o químicos.

**Ambiente hiperbárico:** Medio con una alta presión atmosférica, como la que hay bajo el agua.

**Auscultación:** Término utilizado para designar las técnicas empleadas en ingeniería y geotecnia para medir los movimientos en las estructuras enterradas debidos a cambios de las condiciones del terreno.

**Babinski-Weill (marcha en estrella):** Es una prueba de equilibrio en la que se trata de poner de manifiesto las posibles alteraciones del desplazamiento del paciente.

**Back up:** Componente básico de una tuneladora EPB constituido por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que ruedan sobre rieles que la misma tuneladora coloca, donde se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

**Berma:** Rellano en un talud o muro para interrumpir su continuidad y aumentar su seguridad contra deslizamientos o desprendimientos, pueden tener una cuneta para canalizar las aguas de escorrentía y evitar la erosión o degradación del talud inferior.

**Bóveda:** Zona superior del interior del túnel. Obra de fábrica curvada, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros.

**Bulón:** Elemento de sostenimiento consistente en una barra metálica que se instala, anclada, en taladros en las paredes de una excavación.

**Cámara hiperbárica:** Recipiente resistente a la presión interior, utilizado para mantener a personas en un medio hiperbárico respirable.

**Cámara de descompresión:** Cámara hiperbárica de dos o más compartimentos, utilizada para realizar o completar periodos de descompresión en superficie, o bien realizar recompresiones formando parte de operaciones de buceo.

**Centro hiperbárico:** Todo aquel centro que dispone de los elementos adecuados para proporcionar un tratamiento a los accidentados de buceo, y apoyar una operación de buceo.

**Carstificación:** Alteración de las rocas carbonatadas debido a la disolución por las aguas meteóricas cargadas de gas carbónico, formando cuevas y simas.

**Cercha:** Armazón que sostiene un arco.

**Clave:** Dovela central de un arco, o una bóveda. Suele ser de mayores dimensiones que las demás dovelas. La clave, al igual que las dovelas, se sustenta debido a la forma de éstas piezas, pues sus caras laterales, cortadas en ángulo, transmiten lateralmente parte de las tensiones, equilibrándolo, y evitando que se desplomen bajo una carga vertical. La presión horizontal de la dovela inferior se transmite al muro o a otro arco, y la vertical se transmite al muro. La última pieza que se coloca en la construcción de un arco es la clave.

**Cobertera:** Espesor de terreno que queda entre la parte superior del túnel y la superficie.

**Colapso:** Caída instantánea de una estructura o parte de un macizo por fallo en el terreno de sustentación.

**Coluvial:** Acumulaciones laterales de sedimentos en un valle cuyo recorrido y transporte es reducido.

**Cortadores:** Elementos que rompen la roca en una tuneladora de escudo.

**Derrumbe:** Caída súbita de bloques rocosos.

**Deslizamiento:** Tipo de corrimiento o movimiento de masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud. Se produce cuando una gran masa de terreno se convierte en zona inestable y desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño espesor.

**DAN:** Divers Alert Network es un grupo de organizaciones sin fines de lucro dedicadas a mejorar la seguridad del buceo para todos los buceadores. Fue fundada en Durham, Carolina del Norte, Estados Unidos, en 1980 en la Universidad de Duke, brindando asistencia médica telefónica de buceo las 24 horas, los 7 días de la semana. Desde entonces, la organización se ha expandido a nivel mundial y ahora tiene organizaciones

regionales independientes en América del Norte , Europa , Japón , Asia-Pacífico y África austral.

**Dovela:** Cada una de las piezas que conforman un anillo de sostenimiento de la sección de un túnel construidas con hormigón armado o pretensado. La tensión horizontal de la dovela inferior se transmite al muro o a otro arco, y la vertical se transmite al muro. La última pieza que se coloca en la construcción de un arco es la clave.

**Estallido de roca:** Fenómeno que se da cuando un macizo rocoso con características rígidas (duro y compacto) es sometido a altas presiones, que al no poder deformarse lo suficiente, comienza paulatinamente a almacenar energía de deformación. Este continuo almacenamiento de energía llega a un punto crítico donde se produce una liberación violenta de energía, originando el estallido de rocas.

**Emboquille:** Boca o entrada del túnel. Intersección entre talud y túnel.

**Entibación:** Estructura de contención provisional, empleada habitualmente en construcción e ingeniería civil.

**Falla:** Superficie o superficies con espaciado apretado de una fractura en una roca, a lo largo de la cual ha habido desplazamiento, que puede variar desde unos pocos milímetros a muchos kilómetros. Un plano de falla es una superficie de falla que normalmente es más o menos plana.

**Fluencia:** Deformación lenta experimentada por un cuerpo sometido a una carga durante un cierto tiempo. A profundidades importantes, cuando se perfora un túnel, rocas con importante contenido en arcillas (pizarras, arcillitas...) o materia orgánica (grafito, carbón) pueden llegar a fluir cerrando la sección de la excavación.

**Fracturación:** Conjunto de roturas de un macizo rocoso formando planos con o sin desplazamiento entre sí.

**Freático/a:** Se dice de la parte del subsuelo saturada de agua, y de esta misma agua.

**Gripper:** Término inglés usado para denominar la zapata móvil de apoyo. Un sistema de gatos perimetrales se apoyan los *grippers* para conseguir el empuje necesario para adelantar en las tuneladoras

**Gunita:** Hormigón proyectado a chorro sobre una superficie con una manga que transporta el material y lo empuja mediante una bomba de aire comprimido.

**Hastial:** Cara lateral de una excavación.

**Inyección:** Aplicación de mortero, lechada de cemento, bentonita u otro fluido viscoso para sellar juntas, huecos, grietas y conseguir su inmovilización en la excavación del túnel.

**Meteorización:** Término que agrupa todos los procesos por los que la roca y el suelo se alteran bajo la influencia directa de la hidrosfera y de la atmósfera.

**Pase:** Longitud de túnel sin sostenimiento entre dos avances de la máquina tuneladora.

**Revestimiento:** Cubierta de la superficie interior de la sección de un túnel para el acabado final sin función estructural.

**Rieles:** Cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes y tranvías.

**Rippers:** Elementos que arrancan los suelos. Desmenuzadores, desgüezadores, desgarradores, destripadores.

**Roomberg:** La prueba o test de Romberg es una maniobra clínica simple que busca encontrar un trastorno en la coordinación del movimiento y en el equilibrio de una persona.

**Samson:** bomba de aire a la cámara de escombros

**Sepultamiento:** Enterramiento por caída súbita de parte del terreno de una excavación o desprendimiento de bloques rocosos.

**Sobreexcavación:** Vacío dejado entre el escudo de la máquina tuneladora o entre las dovelas de sostenimiento y el terreno, debido al sobre ancho que genera la excavación de la sección del túnel con el disco de la tuneladora.

**Sostenimiento:** Refuerzo que se práctica contra el terreno de la superficie del túnel para evitar su colapso o desmoronamiento.

**Subsidencia:** Hundimiento progresivo, durante un periodo bastante largo, de la superficie de un terreno siendo la componente vertical del desplazamiento claramente predominante sobre la horizontal.

**T.B.M. (Tunnel Boring Machine):** Máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de la entibación para la sustentación del túnel si ésta es necesaria, ya sea de forma provisional o definitiva.

**Tornillo de Arquímedes:** máquina gravimétrica helicoidal utilizada para la elevación de material excavado u otros materiales. Consiste en un tornillo (“superficie helicoidal que rodea a un cilindro”) dentro de un tubo. Debido a que el tornillo rota, este hace que el material fluidificado que se encuentra debajo ascienda por la superficie helicoidal que lo rodea. Elemento que forma parte de la estructura de las tuneladoras EPBs.

**Zapata de apoyo:** Pieza colocada en las zonas laterales de la máquina tuneladora para soportar contra de la pared del túnel el empuje del disco de excavación frontal y ejercer la fuerza de reacción.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

1. Barbosa E. Efecto de la presión hiperbárica y diferentes presiones parciales de gases sobre la modulación vegetativa de la respuesta cardiaca : aplicación de métodos lineales y no lineales en el análisis de VFC [Internet]. 2011 [cited 9 September 2019]. Available from: [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/7112/4/0658409\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/7112/4/0658409_00000_0000.pdf)
2. Cabrera P. La psicología aplicada al buceo [Internet]. Scielo.sld.cu. 1999 [cited 9 September 2019]. Available from: <http://scielo.sld.cu/pdf/mil/v28n2/mil07299.pdf>
3. Cilveti R, Osona B, Peña J, Moreno L, Asensio O. Buceo en la edad pediátrica: fisiología, riesgos y recomendaciones. Anales de Pediatría [Internet]. 2015;83(6):410-416. Available from: <https://www.analesdepediatría.org/es-buceo-edad-pediatrica-fisiologia-riesgos-articulo-S1695403315001150>
4. Courtenay G, Smith D, Gladstone W. Occupational health issues in marine and freshwater research. Journal of Occupational Medicine and Toxicology [Internet]. 2012;7(1):4. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3317851/pdf/1745-6673-7-4.pdf>
5. Ruiz A. Asistencia prehospitalaria en entornos especiales y espacios confinados. Vuelven las tuneladoras EPBs (Earth Pressure Balance) Rescate vial - no 47 - 3er trimestre 2017. Pàg. 16-19. Ed. Pública
6. Ruiz A. Atención prehospitalaria de los accidentes disbáricos de buceo (ADB). Revista Zona TES 2013.
7. Ruiz A. Las tuneladoras EPBs (Earth Pressure Balance). Nuevas tecnologías y nuevos retos para los servicios de emergencias. Emergencia 112. nº 73, junio 2008. Pág.30-32. Ed. APTB.
8. Ruiz A. Tunneliers à pression de terre: Nouvelles technologies et nouveaux défis pour les services d'urgences. Sécurité civile & industriel nº 507, 4º trimestre décembre 2008.
9. Desola J. Accidentes de Buceo (2). Barotraumatismo Respiratório: Síndrome de Sobrepresión pulmonar [Internet]. Medicina Clinica, 1990 nº85 183-90. [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.cccmh.com/REVISTA-OHB/SSP-Med-Clin-ROHB.pdf>
10. Desola J. Accidentes de buceo (1). Enfermedad descompresiva [Internet]. Medicina Clinica, 1990 nº95 147-56. [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.cccmh.com/REVISTA-OHB/Enfermedad-descompresiva-MC-ROHB.pdf>

11. Work under Hyperbaric Conditions Diving and Compressed Air Work in TBM's Tunnel-Boring-Machines [Internet]. Nordseetaucher.de. 2019 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.nordseetaucher.de/assets/PDF-Downloads/Tunneling/NST-Hyperbaric-Tunnel-Construction-and-Diving-e.pdf>
12. La Generalitat adjudica obres del perllongament d'FGC a Sabadell per 218 MEUR i d'infraestructura, equipaments i centres assistencials per valor de 97,4 MEUR [Internet]. Govern.cat. 2019 [cited 8 September 2019]. Available from: <https://govern.cat/salaprensa/notes-premsa/83351/generalitat-adjudica-obres-del-perllongament-fgc-sabadell-218-meur-infraestructura-equipaments-centres-assistencials-valor-974-meur>
13. Tuneladoras EPB: Escudos de presión de tierras – El blog de Víctor Yepes [Internet]. Victoryepes.blogs.upv.es. 2019 [cited 8 September 2019]. Available from: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/09/tuneladoras-epb-escudos-de-presion-de-tierras/>
14. Desola J, Abella G, Bohé J, García Á, Graus S, Martínez E et al. Estimación del riesgo de enfermedad disbárica en caso de descompresión omitida. *Indice dola. Apunts Medicina de l'Esport*. 2000;36(135):25-31.
15. La Generalitat adjudica obres del perllongament d'FGC a Sabadell per 218 MEUR i d'infraestructura, equipaments i centres assistencials per valor de 97,4 MEUR [Internet]. Generalitat de Catalunya. 2007 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://govern.cat/salaprensa/notes-premsa/83351/generalitat-adjudica-obres-del-perllongament-fgc-sabadell-218-meur-infraestructura-equipaments-centres-assistencials-valor-974-meur>
16. *Tuneladoras EPB: Escudos de presión de tierras – El blog de Víctor Yepes*. Victoryepes.blogs.upv.es. (2019). [online] [Accessed 8 Sep. 2019] Available at: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/09/tuneladoras-epb-escudos-de-presion-de-tierras/>
17. European Trauma Course [Internet]. Website. 2019 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.erc.edu/courses/european-trauma-course>
18. Canabal A, Perales N. *Manual de soporte vital avanzado en trauma*. 2nd ed. Ámsterdam: Elsevier Masson; 2009.
19. Desola J. Buceo con escafandra autónoma en la infancia. Consideraciones fisiológicas y criterios de aptitud. *Apunts Medicina de l'Esport* [Internet]. 2006;41(149):34-38. Available from: <https://www.apunts.org/en-pdf-X0213371706889759>
20. Batle J. Efectos del oxígeno hiperbárico sobre el daño oxidativo y los mecanismos antioxidantes en deportistas y su efecto regenerador en las lesiones

- de difícil curación [Internet]. Ibdigital.uib.cat. 2013 [cited 9 September 2019]. Available from: [http://ibdigital.uib.cat/greenstone/collect/tesisUIB/index/assoc/Batle\\_Vi.dir/Batle\\_Vidal\\_Juan\\_Miguel.pdf](http://ibdigital.uib.cat/greenstone/collect/tesisUIB/index/assoc/Batle_Vi.dir/Batle_Vidal_Juan_Miguel.pdf)
21. Fernández Martínez F. Periodization of apnea training [Internet]. 2015 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/acf5/a4396baaaade89a6633be5b7319496963915.pdf>
  22. Szpilman D, Bierens J, Handley A, Orłowski J. Ahogamiento: un desenlace trágico cuando relajamos la vigilancia - Revista de formación para Técnicos en Emergencias Sanitarias - ZONA TES [Internet]. 2012 [cited 9 September 2019]. Available from: [http://www.zonates.com/es/revista-zona-tes/menu-  
revista/numeros-anteriores/vol-2--num-3--julio-septiembre-  
2013/articulos/ahogamiento-un-desenlace-tragico-cuando-relajamos-la-  
vigilancia.aspx](http://www.zonates.com/es/revista-zona-tes/menu-revista/numeros-anteriores/vol-2--num-3--julio-septiembre-2013/articulos/ahogamiento-un-desenlace-tragico-cuando-relajamos-la-vigilancia.aspx)
  23. Desola J. Barotraumatismo pulmonar: síndrome de hiperpresión intratorácica [Internet]. 2008 n°1706 [cited 9 September 2019]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/298441108\\_Barotraumatismo\\_pulmonar\\_sindrome\\_de\\_hiperpresion\\_intratoracica](https://www.researchgate.net/publication/298441108_Barotraumatismo_pulmonar_sindrome_de_hiperpresion_intratoracica)
  24. Desola J. Enfermedad por descompresión [Internet]. 2008 n°1706 - 43 [cited 9 September 2019]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/298441642\\_Enfermedad\\_por\\_descompresion](https://www.researchgate.net/publication/298441642_Enfermedad_por_descompresion)
  25. Desola J. Sala Sanjaume J. Accidentes disbáricos de buceo: guía de actuación inicial [Internet]. 2008 n°1707: 40 – 7. [cited 9 September 2019]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/298447272\\_Accidentes\\_disbaricos\\_de\\_buceo\\_guia\\_de\\_actuacion\\_inicial](https://www.researchgate.net/publication/298447272_Accidentes_disbaricos_de_buceo_guia_de_actuacion_inicial)
  26. A.HenckesF.LionG.CochardJ.ArviouxC.-C.Arvioux. L'œdème pulmonaire en plongée sous-marine autonome: fréquence et gravité à propos d'une série de 19 cas [Internet]. [Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation Volume 27, Issue 9](#), September 2008, pages 694-699 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0750765808002311>
  27. Boletín Oficial del Estado n°42 [Internet]. Boe.es. 1999 [cited 9 September 2019]. Available from: [https://www.boe.es/eli/es/res/1999/01/20/\(3\)/dof/spa/pdf](https://www.boe.es/eli/es/res/1999/01/20/(3)/dof/spa/pdf)

28. Boletín Oficial del Estado nº195 [Internet]. Boe.es. 2012 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.boe.es/boe/dias/2012/08/15/pdfs/BOE-A-2012-10865.pdf>
29. Boletín Oficial del Estado nº280 [Internet]. Boe.es. 1997 [cited 9 September 2019]. Available from: <https://www.boe.es/boe/dias/1997/11/22/pdfs/A34419-34456.pdf>
30. Salas Pardo E, Garcia-Cubillana de la Cruz J, Samalea Perez F. Manual de medicina subacuática e hiperbárica [Internet]. Servicio de medicina subacuática e hiperbárica. 2019 [cited 9 September 2019]. Available from: <http://www.semm.org/MMedSubacHipHGDSF2007.pdf>
31. Barbosa Almeida E. Efecto de la presión hiperbárica y diferentes presiones parciales de gases sobre la modulación vegetativa de la respuesta cardiaca: aplicación de métodos lineales y no lineales en el análisis de VFC [Internet]. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Departamento de Educación Física. 2011 [cited 9 September 2019]. Available from: [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/7112/4/0658409\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/7112/4/0658409_00000_0000.pdf)

## BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA

- Guidelines 2015 del european Resuscitation Council <https://cprguidelines.eu/>
- Monge LA, Schmitz G, González XA. Oxigenoterapia hiperbárica. Rev Med Cos Cen. 2011;68 (599):393-9.
- Pyle R. Insights on Deep Bounce Dive Safety From the Technical Diving Community. Lin, Y-C 2002 Proceedings of the 16th Meeting of the United States-Japan Cooperative Programs on Natural Resources (UJNR). 2017;
- Sánchez L. Descender por el Gran Auzul. Fisiopatología y Accidentes en el Buceo. Medicina respiratoria. 2008;1(3):19-26.
- Dr.-Ing. Siegmund Babendererde, Lübeck-Travemünde, Dipl.-Ing. Tim Babendererde, Bad Schwartau. *TBM Full Face Driving - Recent Innovations*
- JTamborero del Pino, JM (Ingeniero Industrial), Quílez Puig, David (Geólogo). Notas técnicas de Prevención. 905. Año 2011. INSHT
- UTE Túnel Sabadell, GISA Gestió d'Infraestructures SA. *Procedimiento de trabajo para el paso de la tuneladora EPB HK-S510 en la zona urbana de Sabadell entre el pozo de ataque y la futura estación Plaça Espanya 2010*
- MARTÍ, J.V.; YEPES, V.; GONZÁLEZ, F.; ALCALÁ, J. (2012). **Técnicas de voladuras y excavación en túneles**. Apuntes de la Universitat Politècnica de València. Ref. 530, 165 pp.
- [www.asoc.aetos.es/](http://www.asoc.aetos.es/) (Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas).
- [www.etcg.upc.es/asg/tuneles](http://www.etcg.upc.es/asg/tuneles) (web asignatura de túneles de ETCG Barcelona).
- [www.geoconsult.com](http://www.geoconsult.com) (Ingenieros Consultores, s.a.).
- [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com) (Herrenknecht AG Tunnelling Systems. Tunnelling Machines).
- [www.madrid.org/metro](http://www.madrid.org/metro) (web obras del metro de Madrid).
- <http://membres.lycos.fr/aetos/main.htm> (Asociación Española de túneles y obras subterráneas).
- [www.robinstbm.com](http://www.robinstbm.com) (Robbins Company).
- <http://ropdigital.ciccp.es/public/index.php> (Revista de obras públicas).
- [www.shield-method.gr.jp/english/](http://www.shield-method.gr.jp/english/) (Shield Tunneling Association of Japan).
- [www.tunnelbuilder.com](http://www.tunnelbuilder.com) (web noticias grandes túneles en construcción)
- International Commission for Alpine Rescue ( <http://www.ikarcisa.org> )
- International Society for Mountain Medicine ( <http://www.ismmed.org> )
- Comité médico de la Union Internationale des Associations d'Alpinisme ( <http://www.uiiaa.ch> )

- Instituto de Estudios de Medicina de Montaña – IEMM ( <http://www.iemm.org> )
- Apuntes del Máster en Asistencia Integral en Urgencias y Emergencias de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).
- Instituto de Estudios Médicos – IEM ( <http://www.iem-emergencia.com> )

## 14. ANEXOS

# Anexo 1: Ficha médica personal de la Federación Española de Actividades Subacuáticas (FEDAS).



## FICHA MÉDICA PERSONAL

NIVEL :

1

2

FECHA DE LA REVISIÓN .....

### DATOS PERSONALES

Apellidos, Nombre .....

Sexo .....

Lugar y fecha de nacimiento .....

Dirección .....

Teléfono .....

e-Mail .....

## EXAMEN MÉDICO DE APTITUD AL BUCEO DEPORTIVO

Motivación por la que se hace el buceo \_\_\_\_\_  
 Titulación de buceo y año de obtención \_\_\_\_\_  
 Número de inmersiones/año (en los últimos 3 años) \_\_\_\_\_  
 Máxima profundidad alcanzada en el último año \_\_\_\_\_

### ANTECEDENTES QUIRURGICOS Y ANESTESICOS

CIRUGIA	ANESTESIA	CIRUGIA	ANESTESIA
1.-		2.-	
3.-		4.-	
5.-		6.-	
COMENTARIOS : _____			

### ANTECEDENTES MÉDICOS

		SI NO AÑO			SI NO AÑO	
<b>NEUROLOGICO</b>	MENINGITIS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	LIPOTIMIAS FRECUENTES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	PERDIDA TRANSITORIA CONCIENCIA	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....
	CONVULSIONES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		TRAUMA CRANEAL+PERDIDA CONC.		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....
	CEFALEAS FRECUENTES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....				
	COMENTARIOS : _____					
<b>RESPIRATORIO</b>	NEUMOTORAX	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	NEUMONIA	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	CATARROS FRECUENTES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....
	ASMA	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		INFECCIONES VIAS AEREAS ALTAS		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....
	TUBERCULOSIS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....				
	COMENTARIOS : _____					
<b>CARDIOVASCULAR</b>	HIPERTENSIÓN ARTERIAL	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	ARRITMIAS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		
	CARDIOPATÍAS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....				
	COMENTARIOS : _____					
<b>ORL</b>	OTITIS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....				
COMENTARIOS : _____						
<b>DIGESTIVO</b>	GASTRITIS / ULCUS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	GASES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		
	COMENTARIOS : _____					
<b>HORMOMETABOLICO</b>	DIABETES	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	COLESTEROL, ETC	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		
	COMENTARIOS : _____					
<b>MUSCESQUELETICO</b>	DEFICIT MOTOR	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	DEFICIT FUNCIONAL	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		
	COMENTARIOS : _____					
<b>INMUNOLOGICO</b>	ALERGIAS MEDICAMENTOSAS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	OTRAS ALERGIAS	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....		
	COMENTARIOS : _____					

### ANTECEDENTES SUBACUATICOS

	SI NO AÑO	
Barotraumatismos	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	COMENTARIOS : _____
Enfermedad descompresiva	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	COMENTARIOS : _____
Sobrepresión Pulmonar	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	COMENTARIOS : _____
Intoxicación O <sub>2</sub> / Narcosis N <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> .....	COMENTARIOS : _____

### HABITOS

ALCOHOL : \_\_\_\_\_ TABACO : \_\_\_\_\_ CAFÉ : \_\_\_\_\_

OTROS HABITOS TÓXICOS : \_\_\_\_\_

LENTILLAS : \_\_\_\_\_

COMENTARIOS : \_\_\_\_\_

### MEDICACION ACTUAL

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Firmado Submarinista

Fecha

## EXAMEN MÉDICO DE APTITUD AL BUCEO DEPORTIVO

### DATOS SUBMARINISTA

#### LABORATORIO

Otras:

HB g/dl	GLU mg/d	TP %

### EXPLORACIÓN FÍSICA

#### TENSIÓN ARTERIAL

SISTOLICA	DIASTOLICA

	<b>OK</b>	<b>NO</b>		<b>OK</b>	<b>NO</b>
<b>NEUROLOGICO</b>			Superficial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Marcha	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comentarios: .....					

#### RESPIRATORIO

#### CARDIOVASCULAR

	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>OFT.</b>			Visión cerca		Visión lejos
Comentarios: .....					

	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>ORL.</b>			Otoscopia:		Valsalva: (movilidad y cicatrices)
			Dentadura:		<input type="checkbox"/>
Comentarios: .....					

	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>MUSCULO-ESQUELETICO</b>			Motora		Funcional
Comentarios: .....					

#### OTRAS EN FUNCION DE LA ANAMNESIS

	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
Comentarios:	.....				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
Comentarios:	.....				

### PERFIL PSICOLÓGICO

VALORACIÓN

APTO

NO APTO

**RECOMENDACIONES:** .....

.....

.....

Dr. \_\_\_\_\_

Nº Colegiado \_\_\_\_\_

Diplomado en Medicina Subacuática e Hiperbárica  
 Certificado

# PRUEBAS

Departamento Médico FEDAS



ASA I y ASA II

## NIVEL 1

Ninguna Excepto lo que determine la anamnesis y/o la exploración física  
Excepciones:  
> 40 Años EKG  
> 60 Años EKG / RX Tórax / Glicemia

## NIVEL 2

EKG / RX Tórax / Glicemia  
Mas lo que determine la anamnesis y/o la exploración física

## NUEVO PETICIONARIO

Nivel 1 1\* y 2 \*\*

Nivel 2 3\*\*\* / Buceo Técnico (Nitrox y otros) / Instructores

EKG  
TORAX (AP)  
ANALÍTICA Hemograma  
Glicemia

ASA I Paciente Sano sin patología general

ASA II Enfermedad Sistémica leve. Sin limitación funcional de ningún tipo

ACTUALIZACIÓN 16/11/2003

## Anexo 2: Ficha técnica utilizada para las revisiones médicas a los buceadores en el IEM.



### REVISIONS MÈDIQUES DE BUSSEIG

Recreativa

Professional

Data de la revisió | Fecha de la revisión

#### DADES PERSONALS

Nom   Nombre	
Cognoms   Apellidos	
Sexe   Sexo	
Data de naixement   Fecha de nacimiento	
Lloc de naixement   Lugar de nacimiento	
Adreça actual   Dirección actual	
Codi postal   Código postal	
Població   Población	
DNI/Passaport/Pasaporte	
Edat   Edad	
Correu electrònic   Correo electrónico	
Telèfon   Teléfono	
Centre Immersió	

Institut d'Estudis Mèdics

C/ Salvador Espriu, 73-75 - 08005 Barcelona - Tel.: 93 433 51 90 - [www.iem-emergencia.com](http://www.iem-emergencia.com) - [info@iem-emergencia.com](mailto:info@iem-emergencia.com)

## Anamnesi

### Antecedents hiperbàrics

Primera titulació d'escafandrisme i any d'obtenció	
Darrera titulació actual d'escafandrisme i any d'obtenció	
Nombre d'immersions/any (en els darrers 3 anys)	
Màxima fondària assolida en el darrer any	
Altres entorns hiperbàrics	

### Antecedents pa to lògics

	sí	no	any	notes		sí	no	any	notes
AMC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Cefalees freqüents	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Consum alcohol	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Limotímies freqüents	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Consum tabac	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Convulsions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Altres hàbits tòxics	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			TCE amb PTC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
DM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			PTC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
HTA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Meningitis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
DLP	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Gastritis/Ulcus	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Cardiopaties	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Flatulències	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Neumotòrax	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			IQ amb AG	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Asma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			MD	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
TBC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			SP	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Neumònia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Barotraumatismes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
I/AA freqüents	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Narcosi N <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Otitis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Intoxicació O <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Altres (especificar)	
Medicació actual	

Signatura vist i plau del/de la pacient

## exploracions

### EXPLORACIÓ FÍSICA

EC	
AC	
AR	
ORL	
ABD	
EN	
AME	

### EXPLORACIONS COMPLEMENTÀRIES

Rx tòrax	
ECG	
Espirometria/SPO <sub>2</sub>	
Anàlisi general de sang	
Anàlisi d'orina	
Altres observacions	

**valoració**

Apte/a

No apte/a

Recomanacions

--

Dr. Agustí Ruiz  
 Núm. Col·legiat 31049  
 Diplomada en Medicina Subaquàtica i Hiperbàrica

# Anexo 3: Resolución del Departament de Salut de la Generalitat de Catalunya en la que se reconoce de interés sanitario el curso de Actualización y Seguridad en Emergencias en Tuneladoras



C/ Roc Boronat, 83-95  
08005 Barcelona  
Tel. 93 551 38 19  
Fax 93 551 75 19

Dr. Agustí Ruiz Caballero

Institut d'Estudis Mèdics, S.L.

Sant Antoni Maria Claret, 282

08041 BARCELONA

En data **28/02/2008 11:56:39**, des de l'entitat **Institut d'Estudis Mèdics, S.L.** es va presentar la sol·licitud amb registre d'entrada núm. **9002E/2767/2008** en la qual es demanava al director de l'Institut d'Estudis de la Salut que se li atorgués el reconeixement d'interès sanitari a: **Actualització en Seguretat i Emergències en Tuneladora**

Atès l'informe dels assessors respecte aquest assumpte.

Atesa l'Ordre de 9 d'octubre de 1986, publicada al DOGC núm. 756, de 22 d'octubre de 1986 per la qual es regula el reconeixement sanitari d'actes de caràcter científic.

Atès el Decret 324/1990, de 21 de desembre d'estructuració, organització i règim de funcionament de l'Institut d'Estudis de la Salut.

## RESOLC:

1. Atorgar el reconeixement d'interès sanitari a:

**Actualització en Seguretat i Emergències en Tuneladora**

2. Tal com s'esmenta en l'Ordre de 9 d'octubre de 1986, caldria que la llengua catalana estigués present en els actes, programes i publicacions relacionats amb l'activitat motiu d'aquesta resolució.

3. L'atorgament d'aquest reconeixement d'interès sanitari no autoritza l'ús de l'emblema de la Generalitat.

4. Que es notifiqui aquesta resolució a la persona interessada.

Mateu Huguet i Recasens  
Director  
Institut d'Estudis de la Salut

Barcelona. 15 de juliol de 2.008

- Data: **15/07/2008 13:13:32**

- Núm. de registre sortida: **9002S/3246/2008**

**NOTA IMPORTANT:** L'atorgament d'aquest Reconeixement d'Interès Sanitari, no autoritza l'ús de l'emblema de la Generalitat.

## Anexo 4:

## **Anexo 5:**

**Curs formacio riscos tuneladores EPB Dep Treball i FLC 2008**