

TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS



Innovation & since
Consistency | 1910

Túneles y Obras Subterráneas

© **Sika S.A.U.**

Ctra. Fuencarral, 72 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)

Túneles y Obras Subterráneas

Alberto Rey Sabín *Ingeniero de Minas/MBA Executive*

Gabriel Pardo Fernández *Ingeniero de Minas/MBA Executive*

Raúl Hurtado Agra *Ingeniero Técnico Aeronáutico*

Impreso en España
Printed in Spain
Gráficas Couché, S.L.

Depósito Legal: M-14827-2010

100 AÑOS DE SIKA

En 2010 se celebra el 100 Aniversario de Sika. Es un buen momento para la empresa de echar la vista atrás y observar los maravillosos resultados obtenidos y mirar con esperanza hacia el futuro.

Desde hace 100 años, Sika es sinónimo de servicio y progreso. Su distintivo triángulo personaliza desde hace décadas la continuidad y solidez de la empresa. Precisamente, el slogan del centenario “ Innovation & Consistency since 1910”, alude a la innovación y la consistencia, características principales de Sika y sus productos desde su fundación en 1910.

Kaspar Winkler, llevado por un espíritu emprendedor, sentó las bases de la compañía Sika en 1910. Había nacido en una familia de zapateros y emigró a una corta edad desde Austria a Suiza, donde inventó el Sika-1, aditivo impermeabilizante de fraguado rápido para mortero, empleado en la impermeabilización del Túnel de San Gotardo, que permitió a la Compañía Suiza de Trenes electrificar esta importante conexión entre el norte y el sur de Europa. Winkler supo reconocer una demanda global para sus aditivos pioneros y creó filiales en toda Europa. Ya en los años 30 del siglo XX existían 15 filiales Sika en Europa, Estados Unidos, Brasil y Japón, estableciendo nuevos mercados para los productos químicos para la construcción.

La compañía continuó creciendo a lo largo del Siglo XX por todo el planeta hasta convertirse en suministrador líder mundial de productos químicos para la construcción, con especial relevancia de sus sistemas completos de soluciones. La posterior diversificación de la empresa hacia el relacionado campo de los adhesivos industriales llegó a principios de la década de 1980, impulsada por el éxito del versátil Sikaflex.



En el futuro de Sika los principios del desarrollo sostenible jugarán un papel importante. Son la respuesta a los desafíos actuales y futuros, que tienen como cuestiones fundamentales el suministro de agua, el ahorro energético y la protección del clima. Temas que condicionarán los aspectos económicos y el crecimiento próximo de nuestra sociedad. El éxito como empresa, por lo tanto, depende de las soluciones inteligentes aportadas con respecto a estas grandes cuestiones.

Sika puede estar orgullosa de su historia y mirar con optimismo hacia el futuro, sabiendo que su “know how”, su servicio y sus productos son más necesarios que nunca.



HITOS EN LA HISTORIA DE SIKA

- 1906** Kaspar Winkler comienza a desarrollar nuevos materiales de construcción
- 1910** Kaspar Winkler se instala por su cuenta e inventa “Sika” (Sika-1)
- 1911** Se registra comercialmente Kaspar Winkler & Co.
- 1918** La Compañía Nacional Suiza de Trenes realiza pruebas para impermeabilizar los túneles del Gotardo con “Sika” (Sika®-1). Esto supone el gran salto empresarial para Kaspar Winkler & Co. Entre 1918 y 1922, se impermeabilizan con Sika 67 túneles a lo largo de todo el Gotardo.
- 1921** La primera filial en el Sur de Alemania.
- 1932** Lanzamiento al mercado de **Plastiment®**, el primer retardante y reductor de agua para hormigón.
- 1934** Primera filial en Sudamérica: Brasil.
- 1949** Transferencia de la compañía por parte de Kaspar Winkler (+1951) a Fritz Schenker.
- 1959** Filial en Nueva Zelanda; la primera vez que Sika tiene representación en todos los continentes.
- 1968** Fundación de Sika Finanz AG (hoy Sika AG).
- 1968** Inauguración de la planta en Dürdingen, Friburgo.
- 1968** Invención del **Sikaflex®**.
- 1971** Reestructuración: Sika Finanz AG se convierte en la compañía holding del Grupo. Por primera vez el Grupo es dirigido por alguien ajeno a la familia propietaria.
- 1974** Cotización de Sika Finanz AG en la Bolsa.
- 1975** Lanzamiento de **Sikadur®**, **Sikagard®** y **Sikafloor®**
- 1983** Decisión de puesta en marcha de Sika Industria como segunda división de la empresa.
- 1990** Retirada de Romuald Burkard como Presidente del Consejo de Directores; desde entonces el Consejo Ejecutivo es controlado por personas no pertenecientes a la familia propietaria.
- 1994** Lanzamiento del sistema **Sika CarboDur®**.
- 1996** La Distribución se convierte en negocio estratégico para la empresa.
- 2000** Lanzamiento de **Sika ViscoCrete®** tecnología de hormigón autocompactable.
- 2000** Formulación de los 5 campos de aplicación fundamentales: “sellado, pegado, impermeabilización, refuerzo, protección”.
- 2002** Se cambia el nombre de Sika Finanz AG por Sika AG.
- 2005** Sika adquiere Sarna Kunststoff Holding AG (número de empleados +12%, Facturación +14%).
- 2006** Estructura matricial con 4 Unidades de Negocio: “Hormigón, Aplicadores, Distribución e Industria”.
- 2008** Puesta en marcha de la ultramoderna fábrica de adhesivos elásticos Kapaflex en Dürdingen.
- 2008** Inauguración del Nuevo Centro Tecnológico de I+D en Tüffenwies, Zurich.

PREFACE

Dear Reader, 100 years ago the Swiss company Sika was founded by a real pioneer Kaspar Winkler. The first products were used to waterproof the existing railway tunnels during the electrification of the European railway system.

The history of the company is a source of pride and satisfaction for all of the members of the Sika family who have set an example of pioneering spirit, innovation, high quality and excellent professional relationship.



Impermeabilisation of Lötschberg (Switzerland) railway tunnel

The history of Sika runs parallel to the development of tunnelling because Switzerland always has been a tunnelling country due to its geographical location in the centre of Europe.

At the time the Gotthard Base Tunnel is under construction and when completed with a total length of 57 km, it will be the longest railway tunnel in the world. The total tunnel system consists of 153.3 km of access tunnels, shafts, railway tunnels, connecting galleries and auxiliary structures.

Conventional tunnelling as well as excavation by TBM has been used



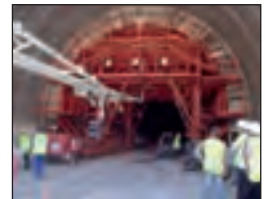
Impressions from the Gotthard Base Tunnel

New quality standards with a durability design of >100 years have been set in a more and more mechanised construction procedure.

Many engineers from Spanish Main Contractors have taken the opportunity to visit this impressive tunnel site.

“Tuneles y Obras Subterráneas” has been overhauled and is published in a new edition. Take your time to read this book or use it as a reference book. The technical consultants from our Sika tunnelling team will always be willing to support you.

Sika Services AG
Dr. Gustav Bracher
Corporate Key Project Manager



© Sika S.A.U.

Este documento es propiedad exclusiva de Sika, S.A.U., teniendo su dirección en Carretera de Fuencarral, 72, Polígono Industrial de Alcobendas, 28108 Alcobendas (Madrid). El uso de este documento está expresamente prohibido para copiarlo, o de alguna manera reproducirlo total o parcialmente, sin el consentimiento por escrito de Sika, S.A.U. Cualquier abuso de estas indicaciones será perseguido legalmente.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
2	GENERALIDADES	13
2.1	NUEVO MÉTODO AUSTRIACO (NATM).....	14
2.2	EXCAVACIÓN DE TÚNELES CON MÁQUINAS TUNELADORAS	17
3	HORMIGONES PROYECTADOS	19
3.1	SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA SECA	20
3.2	SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA HÚMEDA	21
3.3	SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA SEMIHÚMEDA	22
3.4	EL ARTE DE GUNITAR.....	23
3.5	MATERIALES.....	23
3.5.1	ÁRIDOS.....	24
3.5.2	CEMENTOS.....	25
3.5.3	AGUA.....	26
3.5.4	ADITIVOS.....	26
3.5.5	ADICIONES	28
3.6	TIPOS DE HORMIGÓN PROYECTADO.....	31
3.6.1	PROPIEDADES Y NOMENCLATURA.....	31
3.6.2	NORMATIVA ACTUAL, CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS	34
3.6.3	FABRICACIÓN, DOSIFICACIÓN, TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA	39
3.6.4	CRITERIOS DE CONSUMO Y MEDICIONES	50
3.6.5	DOSIFICACIONES TIPO Y PARAMETROS DE TRABAJO	51
3.7	COMPARATIVA DE SISTEMAS DE PROYECCIÓN.....	58
3.7.1	ACELERANTES LIBRES DE ÁLCALI (AF).....	59
3.8	REFERENCIAS.....	62

4	HORMIGÓN DE REVESTIMIENTO DE TÚNELES	103
4.1	INTRODUCCIÓN	103
4.2	DISEÑO Y ENSAYOS DEL HORMIGÓN DE REVESTIMIENTO	113
4.3	GAMA SIKA PARA HORMIGÓN DE REVESTIMIENTO	117
5	REPARACIÓN DE TÚNELES	119
5.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	120
5.2	IMPERMEABILIDAD	120
5.3	DURABILIDAD	121
5.4	BAJO MÓDULO DE ELASTICIDAD	122
5.5	RESISTENCIA AL FUEGO	125
5.5.1	HORMIGÓN RESISTENTE AL FUEGO PARA REVESTIMIENTOS ESTRUCTURALES Y REPARACIÓN DE TÚNELES	131
6	INYECCIONES	131
6.1	TIPOS DE INYECCIÓN	132
6.2	PRODUCTOS SIKA PARA INYECCIONES	132
7	IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES	135
7.1	INFLUENCIA DEL TERRENO Y DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO	135
7.2	INFLUENCIA DEL AGUA	138
7.3	INFLUENCIA DEL USO DEL TUNEL	140
7.4	REQUISITOS PARA UNA CORRECTA IMPERMEABILIZACIÓN	142
7.5	SOPORTE PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN	142
7.6	SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN	143
7.6.1	IMPERMEABILIZACIÓN PRIMARIA	143
7.6.2	IMPERMEABILIZACIÓN INTERMEDIA	145
7.6.3	IMPERMEABILIZACIÓN PRINCIPAL	145
7.6.4	IMPERMEABILIZACIÓN POSTERIOR	151
7.7	NUEVO SISTEMA OBERHASLI SIKA	151
7.7.1	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	151
7.7.2	NORMAS PARA CONSULTA	152
7.7.3	REQUISITOS DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE UN TÚNEL	153
7.7.4	SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN – MATERIALES	155
7.7.5	APLICACIÓN DEL SISTEMA	157

7.8	SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES BAJO PRESIÓN DE AGUA CON MEMBRANAS FLEXIBLES	160
7.8.1	INTRODUCCIÓN.....	161
7.8.2	CONCEPTO DE LA IMPERMEABILIZACIÓN COMPLETA.....	164
7.8.3	CONCLUSIONES DEL SISTEMA.....	171
7.9	CONCLUSIONES DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES	171
8	CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES CON MÁQUINAS TUNELADORAS	173
8.1	INTRODUCCION	173
8.2	TÚNELES CON MÁQUINAS TUNELADORAS TBM	174
8.3	PRODUCTOS SIKA EN TUNELADORAS	178
8.3.1	FABRICACIÓN DE DOVELAS	178
8.3.2	EJEMPLOS Y CASOS PRACTICOS DE DOSIFICACIONES PARA FABRICACION DE DOVELAS.....	181
8.3.3	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA PARA DOVELAS HA-120.....	182
8.3.4	MORTERO DE INYECCION DE TRASDOS.....	191
8.3.5	ESPUMAS PARA MAQUINAS TUNELADORAS	195
8.3.6	SIMULADOR DE TBM O.S.C.A.R.....	199
9	TENDENCIAS, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	207
10	BIBLIOGRAFÍA	211

1 INTRODUCCIÓN

En el sector de la Ingeniería Civil, uno de los segmentos en los que se ha producido un mayor empuje y desarrollo en España es el de la construcción de túneles y obras subterráneas.

En los últimos 25 años se ha producido un desarrollo y una evolución técnica espectacular en la perforación mecánica de los túneles.

La utilización de máquinas de perforación a sección completa o parcial en terrenos duros se está generalizando. Los procedimientos de excavación han sido ampliamente desarrollados, produciéndose constantemente nuevos avances técnicos.

Al igual que se han realizado numerosos avances tecnológicos en la maquinaria utilizada en los túneles, también se han producido sustanciales mejoras en los diferentes métodos de sostenimientos y revestimientos.

Siempre que la naturaleza del suelo y la dimensión del túnel lo permitan, se deberá dar una mayor prioridad a la perforación mecánica ante la excavación convencional con explosivos. Dentro de las numerosas ventajas de estos procedimientos, las principales son los grandes rendimientos que se obtienen, además de economizar los costes de producción.

En los últimos tiempos, el desarrollo en la utilización de escudos de perforación (TBM) con revestimientos prefabricados (dovelas), es sinónimo de una fabricación industrial de túneles, que se caracteriza por unos rendimientos óptimos y por una calidad excepcional.

Sin embargo, estos procedimientos también tienen sus límites cuando las condiciones geológicas y las características geomecánicas de los materiales son desfavorables, y se unen en un túnel de gran espesor de recubrimiento.

Su sección de perforación modificada por las tensiones primarias del terreno se traduce en deformaciones de rotura que evolucionan con el tiempo, lo que supone la necesidad de utilizar otros métodos complementarios de sostenimiento.

La construcción de un túnel conlleva el planteamiento de una serie de problemas relacionados con las disposiciones a adoptar en las obras, ya sea con los métodos de ejecución, los sistemas y sus equipos. Las soluciones dependerán especialmente de la naturaleza y composición del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua.

La ejecución de túneles y obras subterráneas se impone en la construcción de:

- ▲ **Carreteras**
- ▲ **Ferrocarriles y Líneas de Alta Velocidad**
- ▲ **Canales**
- ▲ **Pasos inferiores en canales, ríos, estrechos o brazos de mar** (carreteras y ferrocarriles)
- ▲ **Obras hidráulicas** (galerías de derivación, tuberías de carga o descarga, centrales subterráneas)
- ▲ **Obras urbanas** (alcantarillado, galerías para cables o tuberías, ferrocarriles metropolitanos, pasos subterráneos de peatones)
- ▲ **Refugios subterráneos** (construcciones militares)
- ▲ **Explotaciones mineras**

La construcción de túneles y obras subterráneas, es uno de los mercados más costosos en la industria de la construcción, debido a la necesidad de realización de investigaciones iniciales tanto geológicas como geofísicas del terreno, así como a las predicciones empíricas de los costes de perforación.

Sika, S.A.U. consciente de la importancia técnica y tecnológica que acompaña a la ejecución de un túnel, y de los constantes desarrollos a los que está sometido este mercado, dispone de una amplia gama de productos idóneos para esta industria de la construcción, y mantiene desde hace ya más de **100 años** su apuesta de mejora continua y constante innovación.

2 GENERALIDADES

Un túnel es una excavación subterránea lineal normalmente horizontal, pero que en algunos casos, por motivos especiales, tiene un ángulo superior a 30° con respecto a la superficie terrestre, en cuyo caso se denomina pozo (inclinado o vertical).

Un túnel que da acceso desde la superficie a una construcción subterránea se conoce con el nombre de ventana. Los túneles destinados al paso de tuberías, cables, desagües, abastecimiento de aguas, calefacción y ventilación se denominan galerías, al igual que los túneles de carácter provisional, que se llaman galerías de avance.



Foto 1.- Emboquille convencional complejo y montaje de TBM

La excavación de túneles ha ido evolucionando con el tiempo dando paso a nuevos sistemas y métodos desarrollados regionalmente en función de las características geomecánicas de los materiales existentes. Así por ejemplo, en cuanto a túneles ejecutados por fases, se pueden diferenciar el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM), el Método Alemán, y el Método Belga, en los que la sección completa se divide en secciones más pequeñas, que se excavan y estabilizan para dar lugar a la sección completa posteriormente.

En cuanto a los túneles excavados a sección completa (TBM), los sistemas parcial o totalmente mecanizados tienen un importante potencial de desarrollo.

2.1 Nuevo método austriaco (NATM)

Los diferentes tipos de secciones de túneles y galerías más utilizados quedan reflejados a continuación en la Figura 1.

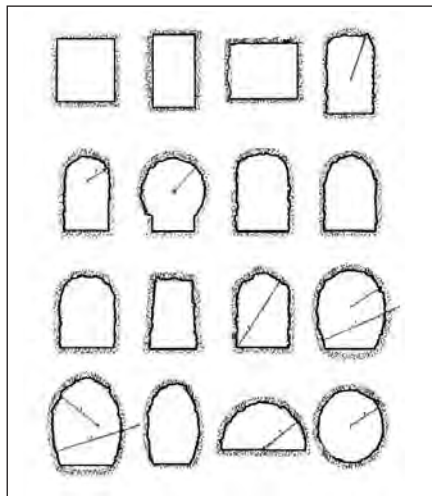


Figura 1.- Tipos de secciones de túneles

Los recientes progresos en el campo de la construcción de túneles, así como el desarrollo de nuevas técnicas de perforación, tiende a buscar un solo objetivo antes de iniciar la ejecución del túnel; perturbar lo mínimo posible las condiciones del terreno excavado.

Al comenzar la excavación de un túnel, el terreno se encuentra en un estado de equilibrio. Como consecuencia del avance de la excavación, este estado de equilibrio se ve alterado y se produce una descompresión del terreno.

Por este motivo, será necesario adoptar métodos constructivos que permitan evitar y limitar al máximo los efectos de dicha descompresión en la zona de la excavación.

Esta descompresión del terreno va acompañada de un efecto de dilatación y de una pérdida irremediable de sus características geomecánicas, de tal forma, que en un terreno descomprimido, la estabilidad del conjunto sólo puede ser asegurada mediante la ejecución de un sostenimiento del terreno adecuado a su comportamiento tensodeformacional.

Una excavación del túnel sin la utilización de explosivos, ejecutado mediante pica, pala mecánica o rozadora limita estas perturbaciones en el terreno, y propicia una menor descompresión del medio.

Mediante la realización de un sostenimiento previo podremos asegurar el terreno y limitar su descompresión al mínimo posible. Con esta filosofía nació lo que se conoce como sistema **NATM** ó **Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles**.

Este método fue patentado en 1.958 por **A. Brunner** (patente Austríaca N° 197851), dándose a conocer al mundo por los Profesores **L. Müller** y **L.V. Rabcewicz** en el año 1.959.

En el **NATM** la formación perimetral de la roca o terreno se integra dentro del arco resistente total. De esta manera, el terreno forma parte en sí mismo de la estructura.

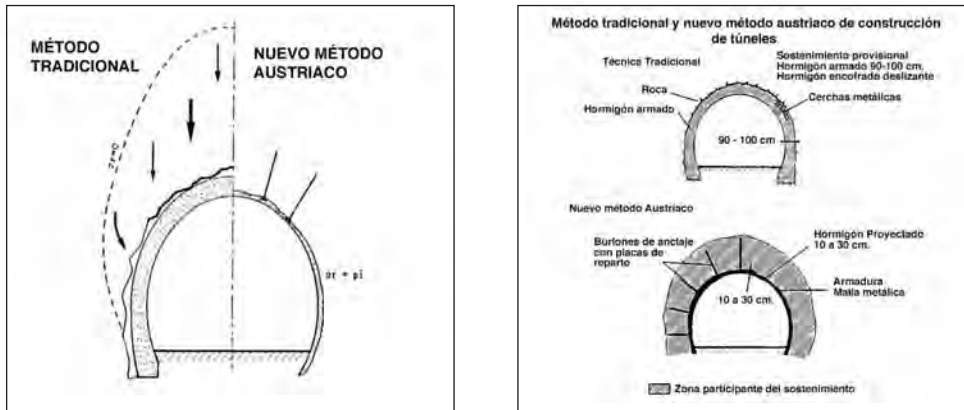


Figura 2.- Comparativas entre métodos tradicionales y el NATM

Dentro del sistema **NATM** deberán tenerse en cuenta los siguientes principios básicos:

- ▲ Los estados adversos de tensión y deformación en el terreno, se deberán corregir mediante un método de sostenimiento apropiado para cada tipo de terreno.
- ▲ En casos desfavorables, la ejecución de una contrabóveda aportará el arco resistente deseado, obteniéndose así, unas propiedades estáticas similares a las de un tubo.
- ▲ El tipo de sostenimiento se irá optimizando de acuerdo con las deformaciones máximas admisibles que presente el terreno.
- ▲ Deberá llevarse un seguimiento exhaustivo de las mediciones generales de control (convergencias), realizando constantes ensayos de optimización del sostenimiento.

Como consecuencia de todo ello, la correcta utilización del **NATM** supone:

- 1º. Ejecución de procedimientos de excavación cuidadosos.
- 2º. Elección de la mejor sección de excavación posible, permitiendo además su adaptación a las condiciones específicas mecánicas de la roca y la distribución de tensiones.
- 3º. El sistema de excavación deberá de adaptarse a las propiedades del terreno encontrado. La estabilidad del frente sin sostenimiento, la elección correcta de la voladura y la longitud del avance, juegan un importante papel para elegir el método operacional más factible y económico.

Los principios específicos del **NATM** son:

- A) El sistema está concebido como una estructura combinada, consistente en una formación del terreno alrededor de la excavación, y varios métodos de sostenimiento, tales como, hormigón proyectado, refuerzos y armados, bulones, cerchas, etc.
- B) El estado tridimensional de la tensión y los esfuerzos son compatibles con las propiedades geomecánicas del terreno.

- C) Necesidad de realización de ensayos sobre muestras del terreno tanto “in situ” como en el laboratorio. En todo momento se deberán tener en cuenta los valores geomecánicos del terreno, su variabilidad a largo plazo así como los efectos producidos por las filtraciones de agua existentes.
- D) En algunas ocasiones será importante que la propia estructura del soporte tenga una suficiente elasticidad, por lo que en dichos casos ciertas zonas del revestimiento se deberán realizar con un sostenimiento ligero.
- E) La ejecución del sostenimiento y la colocación de los bulones de anclaje se realizará en el momento apropiado, con el fin de formar una estructura combinada con el terreno circundante próximo.
- F) El periodo de excavación sin sostenimiento, así como la ejecución de una contrabóveda, se considerará en función de la distribución de las presiones del terreno, y teniendo en cuenta las características reológicas del mismo, además de los tiempos de las operaciones de excavación.
- G) Las constantes mediciones e inspecciones visuales del terreno, así como los diferentes tipos y secciones de sostenimiento, caracterizan el **NATM**.

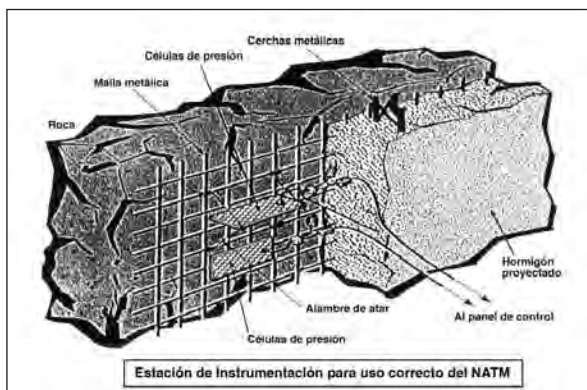


Figura 3.- Instrumentación del NATM

El predimensionamiento del sostenimiento y su optimización de acuerdo con las deformaciones admisibles del terreno garantizarán las operaciones de excavación y la seguridad de los trabajos. Estas mediciones de optimización no solo serán válidas para los aspectos de evaluación operacional sino que servirán posteriormente como documentación geomecánica e informativa del túnel.

- H) El revestimiento definitivo se dimensionará de acuerdo con los cambios de presión resultantes de la alteración del terreno.

Hoy en día, la aplicación del NATM está generalizada en casi todos los proyectos de realización de túneles, y una de las herramientas fundamentales incluida entre los sistemas de sostenimiento, como es el hormigón proyectado, forma parte de la tecnología Sika.

Por otra parte, los desarrollos técnicos de los procedimientos de excavación, transporte, sostenimiento y revestimiento han avanzado tan rápidamente que necesitan de la química de la construcción para conseguir los fines deseados.

2.2 Excavación de túneles con máquinas tuneladoras

La proliferación de obras subterráneas en los últimos tiempos, ha permitido el desarrollo de nuevos equipos de excavación, más versátiles y seguros.

La excavación de túneles con máquinas integrales a sección completa (Tunnel Boring Machine) se divide fundamentalmente en dos grupos, en función del tipo de material a excavar, y de las necesidades de sostenimiento.

En primer lugar, estarían los **Topos**, diseñados fundamentalmente para rocas duras y medias, y por otro lado, los **Escudos**, empleados en rocas blandas y suelos. Un desarrollo posterior sería el **Doble Escudo**, capaz de trabajar con las dos tipologías de terreno descritas.



Foto 2.- Detalle de máquina tuneladora y robot de hormigón proyectado

Dentro de los **Escudos** se puede diferenciar entre **Escudos abiertos**, con frentes estables y afluencias de agua reducidas, y **Escudos cerrados** para terrenos difíciles, saturados, no cohesivos, y con frentes inestables.

Asimismo, en la denominación de **Escudos cerrados**, se agrupan; **Escudos mecanizados de rueda con cierre mecánico**, **Escudos presurizados con aire comprimido**, **Hidroescudos**, y **EPB** (Earth Pressure Balance).

Por todo ello, **Sika** consciente de la importancia técnica que suponen estas tecnologías, ha desarrollado una gama de productos idóneos para esta industria de la construcción. En función del tipo de TBM empleado, disponemos de una amplia gama de productos y equipos auxiliares.

- ▲ **Hormigón proyectado:** Equipos y robots montados en la TBM, aditivos superplastificantes, acelerantes de fraguado, estabilizantes, humo de sílice,...
- ▲ **Espumas:** Agentes espumógenos para el transporte del material extraído, desestructurantes de arcillas, reductores de abrasión, antipolvo, antiespumantes sintéticos para tratamientos posteriores, etc.
- ▲ **Fabricación de dovelas:** Superplastificantes, sistemas de reparación, sistema de protección "Hormigón de 100 años", desencofrantes, etc.



Foto 3.- Acopio de dolevas. Bombas Sika-Aliva en una TBM

- ▲ **Morteros proyectados refractarios:** Para la protección del hormigón
- ▲ **Aditivos Tixotrópicos:** Aditivos tixotropantes para morteros de inyección, acelerantes de fraguado.
- ▲ **Inyecciones:** Resinas sintéticas y poliuretanos para inyecciones de impermeabilización y consolidación.
- ▲ **Equipos auxiliares:** Bombas dosificadoras, recirculadores, depósitos,...

3 HORMIGONES PROYECTADOS

El hormigón proyectado es uno de los procedimientos de ejecución de sostenimientos más importante dentro del llamado Nuevo Método Austríaco, por lo que será necesario definir convenientemente diferentes términos o vocablos.

“Gunitar se define como la puesta en obra de un mortero u hormigón a gran velocidad, que es transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente sobre un soporte”.

“El hormigón proyectado se define como un hormigón que aplicado a máquina, se proyecta a gran velocidad sobre una superficie a través de una manguera y boquilla”.

“Gunitado por vía seca: Procedimiento en el que todos los componentes del hormigón o mortero proyectado son previamente mezclados, a excepción del agua, que es incorporada en la boquilla de salida antes del lanzamiento de la mezcla. El transporte de la mezcla sin agua se realiza a través de las mangueras especiales de forma neumática (flujo diluido) hasta la boquilla”.

“Gunitado por vía húmeda: Procedimiento mediante el cual todos los componentes del hormigón o mortero proyectado, incluyendo el agua, se mezclan previamente antes de ser incorporados a la manguera, a través de la cual serán transportados (mediante flujo diluido o flujo denso) hasta la boquilla de proyección.

La palabra “gunita” no está registrada bajo patentes y actualmente tiene un sitio seguro en el vocabulario técnico. Se conoce en todo el mundo y algunos equivalentes son:

- ▲ “Shotcrete / sprayed concrete” en USA y UK
- ▲ “Beton Projecté” en Francia y Bélgica
- ▲ “Spritzbeton” en Alemania y países germánicos
- ▲ “Mortero y Hormigón Proyectado” en España

En España se disponen de las siguientes Normas para el gunitado: Norma **UNE 83.607** - Recomendaciones de utilización. **UNE 83.600** - Clasificación y Definiciones. **UNE 83.602** - Preparación de muestras. **UNE 83.603** - Determinación RC Penetrómetro. **UNE 83.604** - Determinación RC Arrancamiento. **UNE 83.605** - Preparación probetas testigo. **UNE 83.606** - Ensayo Flexotracción. **UNE 83.608** - Determinación del Rechazo. **UNE 83.609** - Determinación RC “in situ”.

Asimismo, se han elaborado nuevas Normas Europeas para Hormigón Proyectado:

- ▲ **UNE EN 14487-1** (Definiciones y diseño)
- ▲ **UNE EN 14487-2** (Ejecución)
- ▲ **UNE EN 14488-1 a UNE EN 14488-6** (Ensayos)

Existen tres procedimientos distintos de proyección, que se conocen como; **vía seca, vía húmeda y vía semihúmeda**. El sistema de proyección por vía seca y ha sido hasta hace unos 15 años el método más empleado.

Por su parte, el sistema de proyección por vía húmeda se ha generalizado completamente y supone el empleo de más servicios.

El sistema de proyección por vía semihúmeda es una variante de la vía seca que consiste en la adición del agua a la mezcla de hormigón aproximadamente a 5 m de la boquilla de proyección, es un proceso que evita fundamentalmente que la mezcla seca (sobre todo el cemento) se disperse a la hora de realizar la proyección.

3.1 Sistema de proyección por vía seca

El sistema de proyección por vía seca consta de una serie de fases y requiere la utilización de una serie de equipos especializados. Las diferentes fases de este sistema son las siguientes.



Foto 4.- Equipo Sika Aliva para vía seca

- 1º El cemento y los áridos se mezclan adecuadamente hasta conseguir una perfecta homogeneidad de la mezcla. Lo normal es utilizar un cemento Portland tipo I 42.5 R / I 52.5 R aunque en ocasiones se emplean cementos especiales de otro tipo, junto con diferentes clases de áridos (artificiales o naturales, de río o machaqueo).
- 2º La mezcla de cemento/áridos en seco se introduce en la máquina de proyección a través de la tolva de alimentación.
- 3º La mezcla entra en la manguera de transporte mediante una rueda o distribuidor (rotor). En esta fase se puede añadir el aditivo acelerante de fraguado en polvo a la mezcla para conseguir resistencias iniciales altas y favorecer la disminución de rebote.

- 4º La mezcla se transporta mediante aire comprimido hasta una boquilla o pistola especial. Esta boquilla va equipada con un distribuidor múltiple perforado a través del cual se pulveriza el agua a presión y/o el aditivo acelerante de fraguado líquido, que se mezcla con el conjunto cemento/áridos.
- 5º La mezcla ya húmeda se proyecta desde la boquilla sobre la superficie del soporte.

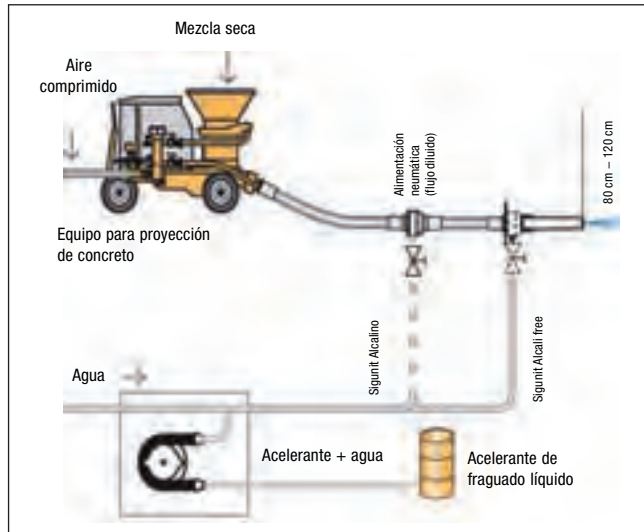


Figura 4.- Sistema de proyección por vía seca

3.2 SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA HÚMEDA

El hormigón proyectado posee propiedades específicas que se manifiestan especialmente a través de la naturaleza del método de colocación. La gunita proyectada por vía seca posee estas propiedades, mientras que en la gunita proyectada por vía húmeda se consiguen morteros y hormigones de propiedades equivalentes con técnicas de dosificación y aditivos.

Las máquinas de proyección por vía húmeda existentes en el mercado pueden ser de dos tipos: **Flujo diluido y Flujo denso**, (transporte por aire comprimido o transporte por bombeo respectivamente).

Dichas máquinas proporcionan unos elevados rendimientos, superiores en todos los casos a los ofrecidos por los equipos de vía seca.

El sistema más utilizado en la actualidad es el método de proyección por vía húmeda y flujo denso. Dichas máquinas se limitan a un bombeo de la mezcla de hormigón a través de mangueras especiales hasta una boquilla de proyección en la que se incorpora el aire comprimido y el aditivo acelerante líquido de fraguado.

Con el empleo de este sistema de proyección, y los recientes desarrollos de aditivos superplastificantes, aditivos acelerantes, maquinaria, bombas dosificadoras, etc., se ha conseguido un sistema de altas prestaciones en cuanto a rendimientos, mínima formación de polvo y de rebote de proyección, así como un mayor control de la relación agua/cemento.

El sistema de proyección por vía húmeda requiere de una serie de equipos especializados, y consta de las siguientes fases:

1º El cemento, los áridos, el agua y los aditivos y las adiciones se mezclan en la planta de hormigón adecuadamente hasta conseguir una perfecta homogeneidad de la mezcla resultante.

Lo normal es utilizar un cemento Portland tipo I 42.5 R / I 52.5 R aunque en ocasiones se emplean cementos especiales de otro tipo, junto con diferentes clases de áridos (artificiales o naturales, de río o machaqueo).

Además, es conveniente estudiar el cono de salida del hormigón así como el tiempo de transporte para conseguir en el momento de la alimentación a la máquina una consistencia adecuada durante toda la operación (Conos 12-18 cm). Se suelen aditar superplastificantes o estabilizadores, según las propiedades requeridas.

2º La mezcla húmeda se introduce en la tolva de alimentación de la máquina de proyección.

3º La mezcla entra en la manguera de transporte mediante una rueda o distribuidor/rotor (flujo diluido), o en los pistones de la bomba (flujo denso).

4º La mezcla se transporta mediante aire comprimido (flujo diluido) o por bombeo (flujo denso) hasta la boquilla de proyección.

Los aditivos acelerantes de fraguado líquidos se adicionan en dicha boquilla de proyección, con el fin de conseguir resistencias iniciales altas y favorecer la disminución del rebote de proyección. La boquilla va equipada con un distribuidor de aire, para favorecer el mezclado y la proyección.

5º La mezcla se proyecta desde la boquilla sobre la superficie que debe gunitarse.

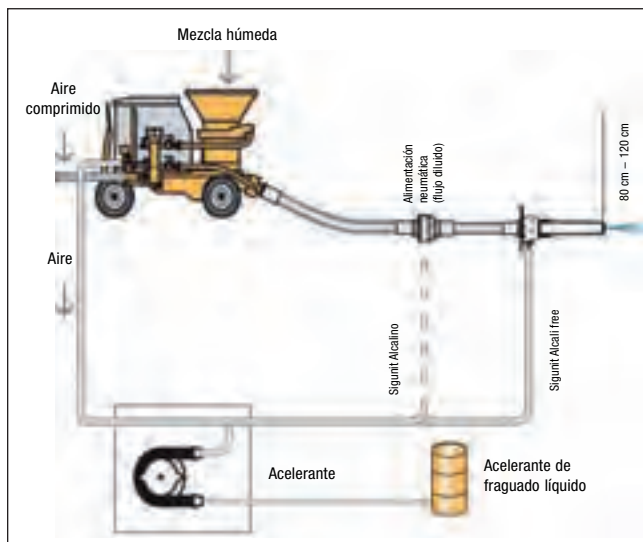


Figura 5.- Sistema de proyección por vía húmeda

3.3 Sistema de proyección por vía semihúmeda

Este sistema, idéntico en sus primeras fases al sistema de proyección por vía seca, únicamente se diferencia de él en que la adición del agua se efectúa a una distancia de 4-5 m de la boquilla de proyección, mejorándose así las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla de la que saldrá el mortero u hormigón proyectado.

Otra de las ventajas de este sistema es que evita el polvo resultante de la proyección por vía seca, así como la pérdida de cemento de la mezcla al salir de la boquilla. También se puede considerar que el agua añadida se incorpora perfectamente durante esos 4-5 m a la mezcla, haciéndola más homogénea y lo que es más importante, manteniendo una relación agua/cemento adecuada.

3.4 El arte de gunitar

Un aspecto importante del uso del hormigón proyectado es el arte de la aplicación, es decir las reglas de la proyección, que redundará en tres aspectos importantes:

- ▲ Comparación de resultados
- ▲ Calidad del hormigón
- ▲ Homogeneidad de sus características durante la obra

Estos aspectos influirán en el coeficiente de variación de dicha homogeneidad, dato muy importante sobre la calidad de la obra ejecutada. Un valor inferior al 10 % es un coeficiente de variación muy aceptable.

En el arte de gunitar, las reglas geométricas de la proyección son un aspecto crítico del proceso. Se debe por ello mantener una distancia desde la boquilla hasta el soporte entre 1 y 1,5 m con un ángulo de proyección de 90°.

Por otro lado, una aplicación mal ejecutada supone un mayor consumo de materiales como causa del aumento del rebote, independientemente de los problemas propios del hormigón colocado como causa de una mala aplicación.

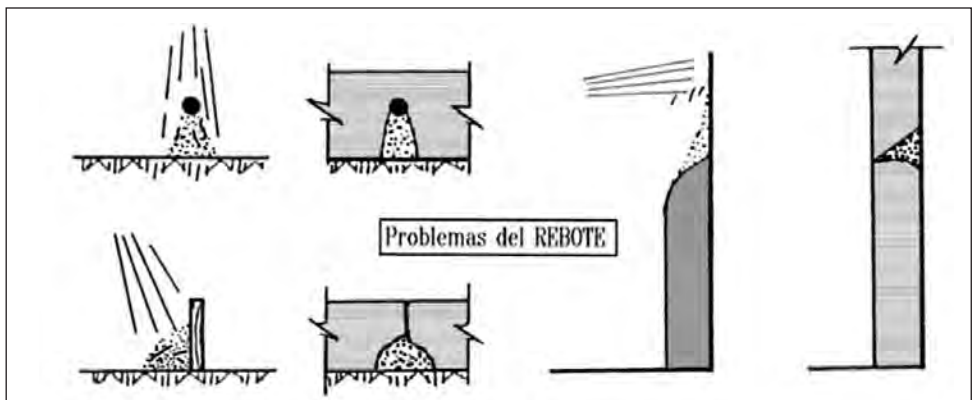


Figura 6.- Posibles problemas en la ejecución

3.5 Materiales

La calidad de los materiales a utilizar, los áridos y sus granulometrías, el cemento y su dosificación, el lugar y las condiciones de trabajo, y por último el equipo empleado influyen en la calidad del hormigón proyectado.

Se deberán realizar ensayos previos, tanto del funcionamiento de los equipos como de los materiales a emplear, para determinar así la composición óptima de la mezcla.

3.5.1 Áridos

Los áridos a emplear en los morteros y hormigones proyectados se obtendrán por la selección y clasificación de materiales naturales o procedentes de machaqueo, o por una mezcla de ambos. Pueden emplearse áridos que no cumplan con la granulometría citada, siempre que en los ensayos preliminares se obtengan buenos resultados.

La arena para las capas de acabado y otras aplicaciones especiales, puede ser también más fina que la granulometría especificada. No obstante, deberá tenerse siempre en cuenta que las arenas más finas favorecen la retracción y las más gruesas incrementan el porcentaje de rebote.

Estos áridos estarán compuestos de partículas limpias, duras, resistentes y de una calidad uniforme. Su forma será redondeada o cúbica y contendrá menos del 15% de partículas planas, delgadas o alargadas, definiendo como una partícula alargada aquella que tiene su máxima dimensión cuatro veces mayor que la mínima.

El empleo de áridos finos o gruesos, o una mezcla de ambos, se hará de acuerdo con el espesor a aplicar en el mortero u hormigón proyectado.

Como norma general en ningún caso se emplearán tamaños superiores a 15 mm, ya que se aumentarían considerablemente los porcentajes de rebote de proyección, a la vez que dificultaría el bombeo de la mezcla a través de las mangueras de transporte.

Se define como árido fino para morteros y hormigones el material compuesto por partículas duras y resistentes del que pasa por el tamiz (nº 4 ASTM) un mínimo del 95 % en peso. Este árido fino estará exento de cualquier sustancia que pueda reaccionar perjudicialmente con los álcalis que contengan el cemento (EHE).

Se define como árido grueso para hormigones, la fracción de árido mineral de la que queda retenida en el tamiz (nº 4 ASTM) un mínimo de 70% en peso.

Los áridos gruesos podrán ser rodados o de machaqueo, debiendo en ambos casos estar constituidos por partículas limpias, sólidas, resistentes y duraderas, de una granulometría uniforme y estar exentas de polvo, suciedad, arcilla, materia orgánica u otras materias perjudiciales. Asimismo, este árido grueso estará exento de cualquier sustancia que pueda reaccionar perjudicialmente con los álcalis.

Las curvas granulométricas **0-4, 0-8, 0-12, 0-15, 0-20 y 0-25** utilizadas por **Sika** para determinar la composición de los áridos se han obtenido a partir de las normas que reflejan un compendio amplio basado en la experiencia de trabajos ejecutados durante un periodo de muchos años:

- ▲ **UNE 83.607-94**
- ▲ **ASTM C 3**
- ▲ **BS 882** (Normas inglesas)
- ▲ **A.C.I.** (Publicación SP-14)
- ▲ Curvas granulométricas de **LINDER**
- ▲ Curvas granulométricas de **DRÖGSLER**

Las curvas para vía seca y vía húmeda 0-12 son las más utilizadas actualmente para la confección de hormigones proyectados y se reflejan en las figuras siguientes.

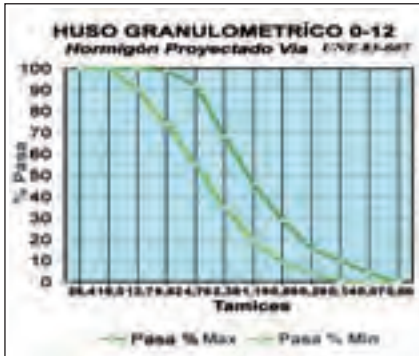


Figura 7.- Huso granulométrico 0-12 para hormigón proyectado por vía húmeda

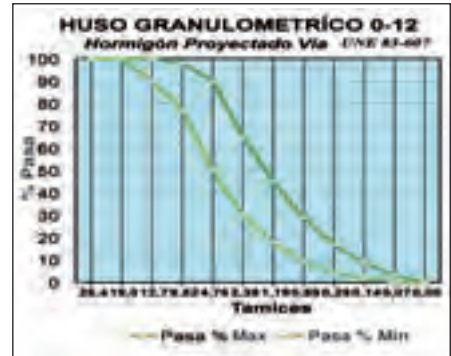


Figura 8.- Huso granulométrico 0-12 para hormigón proyectado por vía seca

3.5.2 Cementos

Se usarán los cementos expresamente indicados en los planos o especificaciones de acuerdo a la definición que figura en el Pliego General de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos. También deberán cumplir las recomendaciones y prescripciones contenidas en la EHE, y las que en lo sucesivo, sean aprobadas con carácter oficial por la Administración.

Normalmente los cementos a utilizar en los morteros u hormigones proyectados serán del tipo CEM I categorías 42,5 R y 52,5 R. En caso de que las condiciones especiales locales lo aconsejaren, se podrán utilizar otros cementos, una vez ensayados, con la aprobación de los proyectistas.

A ser posible, el cemento será de un mismo tipo y de la misma marca, y se fabricará en una misma planta. En los casos en que la gunita vaya a ser expuesta a la acción de suelos o aguas subterráneas con una alta concentración de sulfatos, deberá emplearse cemento resistente a sulfatos (sulforesistente SR).

En los tratamientos para revestimientos refractarios, se deberá emplear cemento aluminoso (endurecimiento rápido), que confiera resistencia al calor y proporcione una mayor resistencia a determinados ácidos. Sin embargo, su empleo requiere una serie de precauciones, debido a su elevado calor inicial de hidratación.

Estas precauciones incluyen una limitación del volumen de la carga y la limpieza frecuente de la maquinaria, equipo y mangueras. También necesitará el empleo de arena muy seca y un fratasado rápido.

En la mezcla de hormigón proyectado, el cemento actúa como un "pegamento" que aglutina y embebe a los áridos dentro de la matriz del cemento. El cemento también es el principal lubricante para un correcto bombeo del hormigón proyectado. Además el cemento será el principal responsable de las características resistentes finales del hormigón proyectado una vez colocado.

Sin embargo, aquí existe un requerimiento adicional fundamental que no existe en el hormigón tradicional, y es que el cemento que se emplee en el hormigón proyectado deberá tener un fraguado extremadamente rápido y proporcionar unas resistencias iniciales muy elevadas.

Un cemento que no reaccione bien con los aditivos acelerantes de fraguado o con las posibles adiciones que se puedan incluir, o un cemento lento, con adiciones, no sería adecuado para la fabricación de un hormigón proyectado a aplicar en el frente de excavación para realizar un sostenimiento correcto.

La situación actual de disponibilidad de cementos, debida en parte a las exigencias del Protocolo de Kyoto y a las fluctuaciones en la demanda del mercado, se ha convertido en una variable más en el proceso.

El comportamiento del hormigón proyectado en los primeros segundos es crítico desde el punto de vista de su puesta en obra.

La menor oferta de cementos del tipo CEM I (ricos en clinker), el suministro desde diferentes centros de producción y la proliferación de cementos CEM II 42,5 A para la elaboración de hormigones proyectados producen variaciones en el comportamiento del hormigón proyectado a esas edades muy tempranas.

Estas variaciones provocan en muchos casos, un ajuste de la fórmula de trabajo, especialmente en meses de clima frío en los que se retrasa el inicio y final de fraguado debido a la baja temperatura de la mezcla.

3.5.3 Agua

El agua para mezclar y curar deberá estar limpia y exenta de sustancias que puedan dañar al hormigón o al acero.

En los casos en que revista importancia la estética, el agua de curado deberá carecer de elementos que produzcan posibles manchas.

El agua de amasado está constituida fundamentalmente por la directamente añadida a la amasada y por la procedente de la humedad de los áridos. El agua deberá cumplir las prescripciones de la EHE vigente.

En cualquier caso, antes de emplear cualquier clase de aguas en el lavado de áridos, amasado y curado, será necesario efectuar cuantos ensayos se consideren precisos para que resulte idónea.

3.5.4 Aditivos

Tanto en los procedimientos por vía seca como por vía húmeda, **Sika, S.A.U.** pone a disposición de sus clientes un servicio de asistencia técnica para la confección del hormigón proyectado a medida.

Dados unos datos iniciales sobre la gunita y el hormigón proyectado, es importante definir ¿qué son los aditivos a medida para el hormigón proyectado?

Cuando se confecciona un Proyecto en el que se especifica una de resistencia a compresión característica para un hormigón proyectado, se suelen definir las resistencias a **24 horas, 3 días, 7 días y 28 días**, para cumplir las necesidades del sostenimiento.

Así mismo, la composición del hormigón conlleva la elección de unos áridos, la dosificación de cemento y la adición de aditivos para reducir el rechazo, bajar la formación de polvo, establecer la relación agua/cemento, conseguir los rendimientos previstos y dosificar adecuadamente los aditivos.

Todos estos parámetros dependerán de:

- ▲ Áridos
- ▲ Cementos
- ▲ Personal especialista / Maquinaria
- ▲ Aditivos: Acelerantes, superplastificantes, estabilizadores, etc.

Sika, S.A.U. dispone de una completa gama de productos y sistemas para el Hormigón Proyectado, así como una tecnología que comprende:

- ▲ Aditivos

VIA SECA

- SIGUNITA 49 AF

VIA HÚMEDA

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| • SIGUNITA L-22R | • SIGUNITA L-26R |
| • SIGUNITA L 53 AFS | • SIGUNITA L 72 AF |
| • SIKAMENT T-3402 | • SIKAMENT T-3412 |
| • SIKAMENT T-1405 | • SIKAVISCOCRETE 5980 |
| • SIKAVISCOCRETE 5720 | • SIKAVISCOCRETE SC-305 |
| • SIKATARD 930 | • SIKAFUME S-92 D |
| • SIKATELL 200 | |

- ▲ Maquinaria (Grupo Aliva, Alianza Sika - Putzmeister)
- ▲ Especialistas Monitores
- ▲ Experiencia en trabajos de Hormigón Proyectado

Nuestro proceso arranca del estudio granulométrico de los áridos utilizados para definir la mezcla de los mismos de acuerdo con curvas granulométricas propias, proponer dosificaciones de cemento para llegar a la mezcla óptima (**calidad/precio**), elección del sistema de proyección, tipos de aditivos, y puede incluir cursos de formación y entrenamiento en el manejo de nuestros productos.

Las soluciones que se aportan para alcanzar los resultados que establezcan las especificaciones como mínimo comprenden:

- ▲ Curvas Granulométricas, con especificación de las proporciones de mezcla de los áridos
- ▲ Dosificación óptima-mínima de cemento
- ▲ Sistema de aditivos a utilizar
- ▲ Sistema de Proyección

3.5.5 Adiciones

i) Humo de sílice

Los antiguos griegos y romanos ya conocían las propiedades hidráulicas de las cenizas de Creta, y las empleaban en la fabricación de sus “cementos”. Un tipo de ceniza particularmente interesante se localizó en la ciudad italiana de Puzzoli, de donde se ha tomado el término de puzolana, para aquellos productos de características y composición similares.

Las puzolanas contienen los mismos elementos químicos principales del cemento Portland como son: Calcio, Silicatos y Aluminatos. Actualmente podemos dividir las Puzolanas en dos grupos:

▲ Naturales

▲ Artificiales

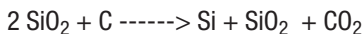
Las Puzolanas naturales están formadas por el enfriamiento rápido de la sílice contenida en la lava de las erupciones volcánicas, siendo sustancias ricas en óxido de sílice.

Las Puzolanas artificiales las podemos dividir a su vez en dos grupos:

▲ Cenizas Volantes

▲ Humo de Sílice

Las primeras, se obtienen en el filtrado de los humos de las centrales térmicas, mientras que el humo de sílice se obtiene como un subproducto en el filtrado de los humos de los hornos de arco eléctrico de producción de sílice o silicatos metálicos. En estos hornos se mezcla óxido de sílice y carbón, dando la siguiente reacción:



En la depuración de los gases obtenemos el SiO en partículas muy finas de un diámetro aproximado de 0,1 μm. Este diámetro es aproximadamente 100 veces menor que las partículas de cemento. Al conjunto de estas partículas también se les conoce por el nombre de harina de sílice, microsíllice, sílice pirogénico, etc.

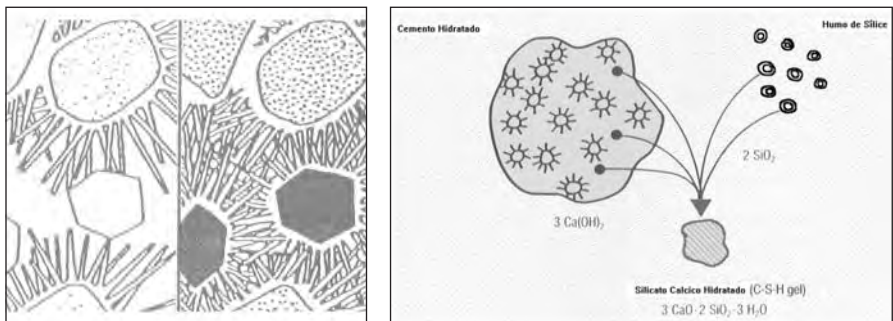
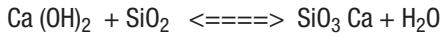


Figura 9.- Representación del proceso

Las pequeñas partículas de humo de sílice rellenan los huecos existentes entre los granos de cemento a la vez que reaccionan con la cal libre del cemento, la cual representa un 25 % de la pasta de cemento y forma silicato cálcico creando una red cristalina entrelazada con la cal del cemento.



De esta forma, la cal libre del cemento tan perjudicial en la pasta de cemento, pasa a ser silicato cálcico, que es un compuesto estable con resistencias propias.

Al entrelazarse su red cristalina con la del cemento, forma una pasta de cemento mucho más resistente a los esfuerzos físicos, a la vez que el silicato cálcico formado, hace que sea también más resistente a los ataques químicos y atmosféricos. De esta forma, se consigue una mayor durabilidad y cumplir los requerimientos de los hormigones proyectados exigidos hoy en día.

El uso del humo de sílice **SIKA FUME S92 D** como adición al hormigón debe siempre de emplearse junto con un superplastificante ya que, por una parte se obtiene una defloculación de dicho humo de sílice y por lo tanto, un buen reparto en la pasta de cemento, y por otra, la defloculación del cemento favoreciendo así la introducción del humo de sílice en el mismo.

ii) Fibras metálicas

Las fibras metálicas incorporadas en el hormigón proyectado mejoran la resistencia a la fisuración, la ductilidad, la absorción de energía y la resistencia al impacto. La presencia de las fibras de acero, transforman el comportamiento frágil de un hormigón en un comportamiento dúctil, soportando deformaciones importantes sin perder su capacidad portante.

Algunos de los aspectos más importantes a tener en cuenta son:

- ▲ Relación Longitud/Diámetro (l/d)
- ▲ Concentración (Nº fibras / kg fibras)
- ▲ Configuración geométrica
- ▲ Alta resistencia a la tracción

Cuanto mayor sea la relación l/d y la concentración de volumen, más alta será su resistencia a la fisuración y al impacto. En conclusión, hace falta un buen equilibrio entre todos estos parámetros para llegar a una alta prestación de la fibra.

La utilización más común en el hormigón proyectado es de fibras de 30 o 40 mm de longitud y 0,50 mm de diámetro.

Las fibras de acero tendrán una resistencia mínima a la tracción de 1100 N/mm². La superficie de dichas fibras deberá estar limpia y no incorporarán lubricantes u otros productos que puedan impedir una buena adherencia al hormigón. La fibra estará conformada para obtener un buen anclaje en el hormigón.

La distribución de fibra en la mezcla deberá ser homogénea evitando la formación de erizos. Las fibras podrán estar encoladas en peines para facilitar su puesta en obra. La dosificación de la fibra será facilitada por el fabricante en base a la resistencia requerida y su propia experiencia (en general será necesario realizar ensayos en la obra). Su mezclado se realizará:

Vía Seca: En la mezcladora, camión hormigonera, cinta transportadora de carga o durante el transporte.

Vía Húmeda: En la mezcladora, dosificadora, camión hormigonera o durante el transporte. Especial cuidado habrá que tener con la consistencia de la mezcla para evitar problemas de trabajabilidad, y posibilitar un reparto homogéneo en el hormigón.

Su adición dependerá de las propiedades requeridas, normalmente se utilizan entre 30 y 50 kg/m³ de fibra metálica.

iii) Fibras sintéticas

Recientemente, se ha incorporado un nuevo tipo de fibras estructurales al proceso del hormigón proyectado. Se trata de las nuevas fibras sintéticas de poliolefina **Sika Fiber T**.

Estas fibras se incorporan sin problemas a la masa del hormigón, sin flotar en la superficie, y no quedan suspendidas en el aire durante la proyección.

Las fibras metálicas, dependiendo de la procedencia (tipo I procedente de hilo como semielaborado ó tipo II procedente de corte de chapa laminada), y dependiendo del proceso de conformado, pueden tener una resistencia a tracción de entre 1.100 – 1.300 MPa.

Las fibras de poliolefina, tienen una resistencia a tracción de entre 300 y 400 MPa. Siendo su resistencia a tracción inferior a la alcanzada por las metálicas, estas nuevas fibras basan la capacidad de refuerzo en la interacción (adherencia) con el conglomerante.

A igualdad de tamaño de fibra, el número de fibras de poliolefina por kilo es muy superior al número de fibras metálicas, puesto que la relación de densidades es del orden de 8,5:1 (7,85 g/cm³ frente a 0,91 g/cm³).

Cuando la rotura por tracción del sistema fibro – reforzado se produce por “pull-out” (pérdida de adherencia), la cantidad de fibras influye en la proximidad entre ellas y en la redistribución de tensiones, así como en la superficie total de contacto.

Garantizar la continuidad de las propiedades durante la vida útil de una estructura se ha convertido en uno de los principales objetivos de cualquier construcción.

Las fibras metálicas en un pH alcalino como es el hormigón, mantienen sus propiedades, ya que se impide su oxidación, que provocaría la pérdida de las propiedades con las que han sido diseñadas.

Sin embargo, la oxidación de cualquier fibra metálica se puede producir:

- ▲ Bien en el proceso previo de almacenamiento y distribución
- ▲ Bien por carbonatación del hormigón, que provoca una disminución del pH y una vía de ataque para cualquier fibra metálica
- ▲ Bien por la entrada de agua y aire a través de micro-fisuras, que provoca la oxidación de las fibras

En cualquier caso, los recubrimientos fijados en la normativa para el hormigón armado, que son los que garantizan la durabilidad ó la no oxidación durante la vida útil de la construcción, no se pueden cumplir en un hormigón reforzado con fibras metálicas, ya que la distribución de la fibras es aleatoria y no es habitual aplicar una capa final sin fibra.

Las fibras **Sika Fiber T** no sufren procesos de oxidación y son más estables químicamente frente a todos los tipos de ataque conocidos. Las fibras de poliolefina garantizan de manera efectiva la durabilidad del sistema (mantenimiento de propiedades durante su vida de servicio). En función de la energía de absorción requerida, la cantidad de este tipo de fibras variará entre 4 y 9 kg/m³.

3.6 Tipos de hormigón proyectado

Además del Hormigón proyectado tradicional, existen los hormigones proyectados especiales que tienen propiedades particulares, obtenidas en general gracias al empleo de mezclas especiales o de aditivos.

Una posible clasificación según su uso sería:

- ▲ Hormigón proyectado estructural
- ▲ Hormigón proyectado de sostenimiento en excavaciones
- ▲ Hormigón proyectado para sostenimientos provisionales
- ▲ Hormigón proyectado para reparaciones

Y atendiendo a sus características se clasificarían en:

- ▲ Mortero proyectado
- ▲ Hormigón proyectado
- ▲ Hormigón proyectado refractario
- ▲ Hormigón proyectado ligero
- ▲ Hormigón proyectado con fibras

Hoy en día, debido a la mejora espectacular de la calidad final del proceso (reducción de A/C, empleo de acelerantes libres de álcali, etc), acompañada de una reducción de las pérdidas por rebote, de un aumento apreciable de los rendimientos de aplicación, y de una reducción de la formación de polvo en el tajo, se puede decir que existe además una nueva categoría.

- ▲ Hormigón proyectado de Altas Prestaciones

Las propiedades del hormigón proyectado se determinan por las características del procedimiento utilizado, y muchas veces están subordinadas a cierto número de factores que dependen entre sí (hasta 25 factores).

- ▲ Composición, manejabilidad y temperatura de la mezcla
- ▲ Relación Agua/Cemento
- ▲ Experiencia del gunitador y tipo de equipo
- ▲ Velocidad de proyección y espesor de capa
- ▲ Estado y naturaleza del soporte y su inclinación
- ▲ Resistencias a compresión simple iniciales solicitadas
- ▲ Etc.

3.6.1 Propiedades y nomenclatura

Las propiedades de un hormigón proyectado se podrían definir de la siguiente manera:

Aspecto - La superficie natural del hormigón proyectado es rugosa. Esta rugosidad depende sobre todo del tamaño del árido grueso utilizado y de la técnica de proyección. El gunitador determina el aspecto final del mismo.

Coloración - Sobre todo en la Vía Seca, aparece una variación de tonalidades grises en la superficie debidas a la distribución del agua en la superficie, y sobre todo, cuando se utilizan acelerantes o cuando se ejecuta el tratamiento en varias fases.

Adherencia - La propiedad más llamativa del hormigón proyectado es su adherencia al soporte de aplicación, con la condición de que el mismo esté sólido, limpio y exento de partes sueltas.

La mezcla impacta contra el soporte a una velocidad elevada taponando las irregularidades, las fisuras y los poros con la ayuda de las partículas más finas, es decir el cemento y los fillers.

Al mismo tiempo sobre el soporte se forma una capa fina de pasta de cemento, en la cual se incrustan los granos de árido grueso, efectuándose un puente o lechada de adherencia (bonding bridge) lo que garantiza después del endurecimiento una fijación sólida al soporte.

Su resistencia al desprendimiento vendrá dada por esta cualidad, variando según la naturaleza de la superficie de aplicación. Esta resistencia al desprendimiento puede variar entre **0,3-2,0 N/mm²**.

Porosidad - El hormigón proyectado generalmente contiene más cantidad de áridos finos y más cantidad de cemento que el hormigón tradicional, por lo que la porosidad es menor. Si además la relación agua/cemento es menor y la compacidad alta, se crean poros bajo forma de inclusiones de aire (filler = 0,2 mm) que no se comunican entre sí.

Densidad aparente - El contenido de cemento y la porosidad determinan la densidad aparente, que varía entre **2.100 a 2.300 kg/m³**.

Resistencia a compresión - Esta resistencia se rige según los principios de la tecnología del hormigón. Dicha resistencia a compresión es, la mayoría de las veces, ligeramente inferior a la de un hormigón normal de granulometría 0-30 mm., debido a la finura del hormigón proyectado.

Como dato standard se alcanzan resistencias a compresión no inferiores a **30 N/mm² a los 28 días**. Sin embargo una característica fundamental del hormigón proyectado es la evolución de las resistencias con el tiempo a causa de su elevado contenido de cemento, **50 N/mm² a los 12 meses y 60 N/mm² a los cuatro años**.

Resistencias iniciales y finales - Según las características impuestas en los Pliegos de Condiciones será necesario adecuar el tipo de hormigón proyectado al fin que se persiga en cuanto a las resistencias solicitadas.

Es muy importante resaltar que unas resistencias iniciales altas por necesidades en sostenimientos obligan a la utilización de acelerantes, lo que conlleva a unas pérdidas de resistencias finales (28 días) importantes, con lo cual se cumple con los requerimientos iniciales pero no con el resultado final.

Hoy en día se puede utilizar un conjunto de aditivos o adiciones que permiten estos usos, pudiéndose definir como la elaboración de un hormigón proyectado a la medida.

Para ello, es necesario estudiar las dosificaciones de cemento, la granulometría de los áridos y los aditivos como el humo de sílice, superplastificantes y acelerantes, que dosificados convenientemente permitan cumplir con las exigencias técnicas que en cada caso se soliciten.

Resistencia a tracción - La resistencia a tracción obtenida en un hormigón proyectado varía entre:

1,6 - 2,1 N/mm² (28 días) y 3,3 - 5,3 N/mm² (3 años)

Permeabilidad - Un hormigón es estanco según la Norma, si su coeficiente de permeabilidad Darcy es igual a:

50 x 10⁻¹⁰ m/s

En el caso del hormigón proyectado, es inferior alcanzando valores de:

6 a 20 x 10⁻¹⁰ m/s

Esta permeabilidad es habitualmente más acusada en la dirección paralela a las capas de proyección.

Módulo de elasticidad - El módulo de elasticidad del Hormigón proyectado varía entre **28.000 y 33.000 N/mm²**

La definición ó nomenclatura de un hormigón proyectado por vía seca viene determinada por su dosificación de cemento con respecto a un m³ de áridos en mezcla seca, y por su resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días.

La definición en el caso de la vía húmeda se rige por las mismas reglas del hormigón tradicional, con la particularidad de que las granulometrías de los áridos en ningún caso deben sobrepasar los 20 mm de diámetro, siendo importante su resistencia a compresión, al igual que en la vía seca.

Como complemento de la definición, es importante definir las curvas granulométricas de los áridos, las cuales determinan fundamentalmente el rechazo o rebote de proyección.

Valores orientativos para un hormigón proyectado vía seca colocado

Dosificación 350 kg de cemento por m³ granulometría 0-12 mm

Contenido de cemento	450 kg/m ³
Relación agua/cemento	0,4-0,5
Peso Específico en seco	2.100-2.200 kg/m ³
Módulo de elasticidad (E)	28.000-33.000 N/mm ²
R.C.S. a 28 días (R ₂₈)	28 N/mm ²
R.C.S. a 1 año (R ₃₆₀)	49 N/mm ²
R.T. a 28 días (R ₂)	1,6 - 2,1 N/mm ²
Adherencia sobre roca	0,1 - 2 N/mm ²
Coef. Permeabilidad según Darcy (C _a)	6 a 20.10-10 m/s
Coef. Conductividad Térmica	1,6 W/m.k
Coef. Resistencia a las heladas (V ₁)	≥ 10
Factor de resistencia al hielo (FR)	≥ 50 %

**Valores orientativos para un hormigón proyectado vía húmeda colocado
Dosificación 400 kg de cemento por m³ granulometría 0-12 mm**

Contenido de cemento	460 kg/m ³
Relación Agua/Cemento	0,45-0
Peso específico en seco	2.300 kg/m ³
Módulo de elasticidad (E)	28.000-33.000 N/mm ²
R.C.S. a 28 días (R28)	30 N/mm ²
R.C.S a 1 año (R360)	50 N/mm ²
R.T. a 28 días (Rz)	1,6 - 2,1 N/mm ²
Adherencia sobre roca	0,1 - 2 N/mm ²
Coef. Permeabilidad según Darcy (Ca)	6 a 20.10-10 m/s
Coef. Conductividad Térmica	1,6 W/m.k
Coef. Resistencia a las heladas (V1)	≥ 10
Factor de resistencia al hielo (FR)	≥ 50 %

3.6.2 Normativa actual, control de calidad y ensayos

Hasta hace unos años, el empleo y control del hormigón proyectado era un desconocido para la mayoría de los contratistas y administraciones.

En la actualidad existe en España una Normativa amplia y suficiente:

UNE 83600 - Clasificación y definiciones

UNE 83601 - Determinación del tiempo de fraguado

UNE 83602 - Preparación de muestras

UNE 83603 - Determinación Resistencias por Penetrómetro

UNE 83604 - Resistencia al arrancamiento

UNE 83605 - Preparación probetas testigo

UNE 83606 - Ensayo a flexotracción

UNE 83607 - Recomendaciones de utilización

UNE 83608 - Determinación del rechazo

UNE 83609 - Ensayo penetración/extracción

De acuerdo con la armonización de Normativa Europea están ya vigentes las nuevas Normas **EN 14487-1** Definiciones y diseño, **EN 14487- 2** Ejecución y **EN 14488-1 a 14488-6** Ensayos.

Para el dimensionado de sostenimientos y revestimientos en túneles y taludes, es importante tener en cuenta los siguientes criterios de diseño:

1.- Criterios:

- 20 cm de hormigón proyectado - 400 kg/m²
- Resistencia a Tracción – 1,8 MPa
- Módulo Elasticidad – 30.000 MPa
- Adherencia – 1 MPa

En lo que respecta a las necesidades de excavación en túneles, la optimización de las características del hormigón proyectado supondría:

2.- Optimización:

- R. Compresión necesaria para perforación y voladuras 10 N/mm²

Y en cuanto al control de las características de resistencia a compresión, un ejemplo para el caso de un hormigón proyectado de 25 MPa podría ser:

3.- R. Compresión mínimas:

- 6 horas > 5 MPa
- 1 día > 10 MPa
- 7 días > 20 MPa
- 28 días > 25 MPa
- 90 días > 30 MPa

Un buen Control de Calidad es básico en cualquier proceso industrial moderno y también lo es en el caso del hormigón proyectado.

La composición del hormigón proyectado debe determinarse en el curso de una serie de ensayos, y en ellos debe estudiarse las propiedades exigidas.

Dichos ensayos deben realizarse en la obra, durante la ejecución, y con antelación al comienzo de la misma, empleando las instalaciones y los componentes del hormigón definitivos en la fase en prueba con diferentes mezclas y propuestas, incluyendo siempre un hormigón de igual composición sin aditivo acelerante (hormigón patrón) con objeto de determinar la caída de resistencias debidas a éste último.

Este hormigón patrón se utilizará también para comprobar la mezcla en las condiciones de la obra. Debido a la dispersión de resultados en el hormigón proyectado, el diseño de la mezcla debe considerar un hormigón de resistencia superior a la especificada.

En este punto cabe recordar que el hormigón proyectado se coloca en capas delgadas (>10 cm de espesor), y que cada capa de 10 cm supone 235 kg/m².

En el caso de un hormigón proyectado para túnel, su curva de resistencia/tiempo debe estar en todo momento por encima de la J2, y muy próximo a ella en los minutos iniciales.

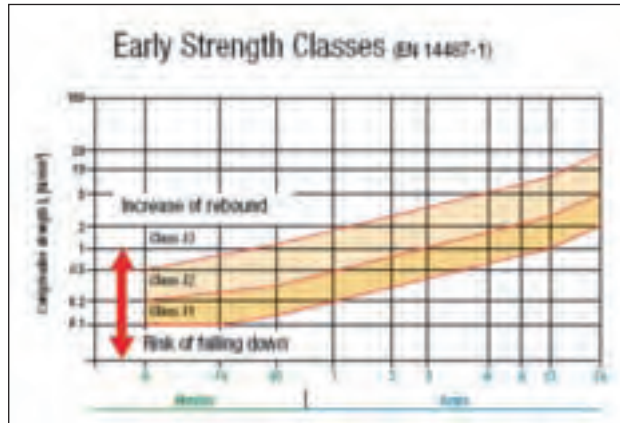


Figura 10.- Curvas J1, J2 y J3 de comportamiento del hormigón proyectado

Es necesario por lo tanto, alcanzar unas resistencias iniciales por medio de los acelerantes de fraguado.

Si la mezcla no queda adherida al soporte no será posible alcanzar rendimientos de trabajo adecuados, además de suponer un elevado riesgo para el personal por la caída del hormigón o incluso de bloques del soporte.

Por todo ello, es necesario evaluar el comportamiento del hormigón recién proyectado sobre el soporte antes de iniciar las labores, sobre paneles a techo como se muestra a continuación o en zonas de la obra preparadas para ello.

Una práctica habitual en estos casos es el ensayo visual proyectando a techo un espesor suficiente de hormigón en las fases iniciales de la excavación.



Foto 5.- Ensayos previos de adherencia sobre paneles

La tecnología del sostenimiento de túneles y taludes con hormigón proyectado, dispone de herramientas de diseño que contemplan las resistencias a compresión iniciales (hormigón proyectado joven) tal y como se detalla a continuación en función de la resistencia esperada.

Resistencia (MPa)	Método de ensayo
0-1	Penetrómetro Proctor o digital (d=3mm)
1-3	HILTI 450 L (cartucho blanco) (!)
3-16	HILTI 450 L (cartucho verde)
>10	Testigos de artesa

Tabla 1.- Método de ensayo de hormigón proyectado en función de la resistencia

Ensayos del hormigón proyectado. Ensayos previos “in situ”. La composición del hormigón debe determinarse en el curso de ensayos, y en ellos, debe estudiarse las propiedades exigidas. Dichos ensayos deben realizarse en la obra y con antelación al comienzo de la misma, empleando las instalaciones y los componentes del hormigón definitivos.

La evaluación posterior dependerá del resultado de los ensayos individuales. Para la determinación de la composición del hormigón, la dosificación de cemento, los porcentajes de áridos, del superplastificante y del aditivo acelerante de fraguado, se propone ensayar diferentes mezclas.

Además, se deberá ensayar un hormigón de igual composición sin aditivo acelerante (hormigón patrón) con objeto de determinar la caída de resistencias. Este hormigón testigo se utilizará también para comprobar la premezcla en las condiciones de la obra.

Debido a la dispersión de resultados en el hormigón proyectado, el diseño de la mezcla debe prever el producir un hormigón de resistencia superior a la especificada.

En la práctica, para preparar un hormigón proyectado con un tamaño máximo entre 8 y 15 mm, el contenido de cemento debe ser de 360 a 480 kg/m³ (sin tener en cuenta el rebote). Si se reduce el contenido de cemento la adherencia del hormigón al soporte se reducirá notablemente.

Ensayos de control de calidad. Por medio de los ensayos de control de calidad durante los trabajos de ejecución, se debe verificar que los testigos (preparados, curados y almacenados según UNE 83.602 y 83.605), de hormigón proyectado alcancen las propiedades exigidas.

Se recomienda llevar un control de calidad periódico de las granulometrías de los áridos, contenido de cemento y resistencias a compresión.

Ensayos de control del hormigón endurecido. Por medio de los ensayos de endurecimiento se examina in situ el hormigón y sus propiedades características. A tal efecto, se han de realizar ensayos en el hormigón “joven” así como sobre testigos extraídos.

Los testigos extraídos según UNE 83.602, deben serlo a su debido tiempo y lo más cercano posible al momento del ensayo.

Métodos de ensayo. La resistencia a compresión del hormigón “joven” se estudia por métodos indirectos (curvas de calibración) basadas en ensayos de endurecimiento. Dichos métodos facilitan medidas indirectas de la resistencia, derivadas de curvas de calibración.

(!) En este intervalo de resistencias no hay un sistema óptimo, no obstante se recomienda el método HILTI por ser experimentalmente el más aproximado a la realidad

Por ello, deberá disponerse de las curvas de calibrado para cada tipo de hormigón que se vaya a ensayar. Cualquier cambio en la composición del hormigón provocará efectos variables en función del método de ensayo que se trate.

Resistencia a la penetración. En este ensayo, se mide la fuerza requerida para empujar una aguja de dimensiones definidas dentro del hormigón proyectado, empleándose un penetrómetro de aguja. El ensayo se describe en la norma UNE 83.603.

Resistencia al arrancamiento (Método HILTI). Sobre la probeta de hormigón proyectado o sobre el terreno proyectado se disparan clavos especiales HILTI que posteriormente son extraídos para medir la fuerza de extracción.

De acuerdo con la profundidad del clavo posteriormente y de acuerdo con tablas establecidas según la calibración de la herramienta de disparo y arrancamiento se pasan las tracciones a resistencia a compresión, según norma UNE 83.604, del material proyectado.

Método HILTI simplificado. Recientemente se ha desarrollado un nuevo método para determinar la resistencia a edades tempranas del hormigón proyectado para el rango de 3 a 16 MPa.

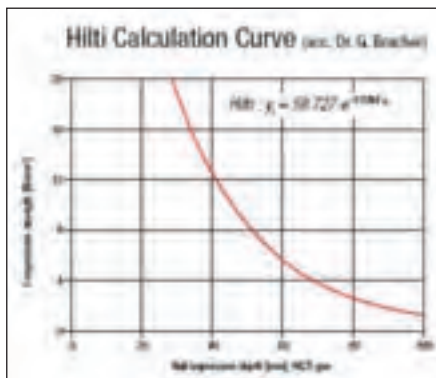


Figura 11.- Curva de determinación de resistencia del método HILTI simplificado

El sistema desarrollado por el Dr. D. Gustav Bracher (Sika Schweiz, A.G), consiste en partir de una serie de medidas (>10) y obtener el resultado trasladándolos sobre la curva empírica correspondiente.

Para ello, se emplearía la pistola HILTI DX 450 L o la nueva versión recientemente lanzada al mercado HILTI DX 450-SCT.

Penetración-extracción de pernos. Se colocan unos pernos dentro del hormigón proyectado para extraerlos posteriormente y medir la fuerza de extracción al arrancamiento.

El parámetro para medir la resistencia es la relación entre la fuerza de extracción y la profundidad de penetración del perno. Este procedimiento está en desuso por las dificultades de colocación.

Resistencia al arrancamiento. Se colocan elementos compuestos de mango y pasador, proyectándose sobre ellos el hormigón; posteriormente son extraídos para medir la resistencia a cortante, según norma UNE 83.604, del material proyectado.

Ensayos directos. Las probetas empleadas para este propósito, son probetas testigo de dimensión apropiada, extraídas del hormigón proyectado, tomadas in situ (al azar en la estructura) o bien en paneles de ensayo proyectados para este fin.

Las condiciones de realización de las muestras, curado, conservación, corte y rotura están desarrolladas en las UNE 83.602 y UNE 83.605. Para determinar la resistencia a compresión se han de ensayar, al menos, tres testigos por ensayo.

Por la experiencia acumulada en la realización de hormigones proyectados por vía húmeda, se recomienda que el diámetro de los testigos sea como mínimo de 70 mm.

Asimismo, la altura de los testigos será lo más aproximado al doble del diámetro.

3.6.3 Fabricación, dosificación, transporte y puesta en obra

Las dosificaciones de los hormigones proyectados, tanto por vía seca como por vía húmeda, están comprendidas entre 360-480 kg de cemento por metro cúbico de mezcla seca.

Se recomienda que la dosificación se realice por peso, ahora bien, por volumen es adecuada cuando el equipo se emplee ocasionalmente.

En la tabla siguiente se proporciona la relación cemento/árido, con la resistencia mínima a la compresión. Estas cifras tan solo representan una directriz general.

En cualquier caso, debe hacerse un estudio del porcentaje de rebote o rechazo en las condiciones de la obra, teniendo en cuenta la naturaleza de los materiales a emplear, y lo más importante la experiencia del personal.

Mezcla en volumen	Mezcla en peso	Mezcla in situ en peso	R.C.S. (28 días)	Uso
1:5,5	1:5	1:3,6	230 kg/cm ²	Exterior
1:5	1:4,5	1:3,5	240 kg/cm ²	
1:4,5	1:4	1:3,2	250 kg/cm ²	Universal
1:4	1:3,5	1:2,8	300 kg/cm ²	
1:3,4	1:3	1:2	360 kg/cm ²	Alta resistencia y refractarios
1:2,2	1:1,2	1:1,2	400 kg/cm ²	

Tabla 2. - Relaciones cemento/áridos para diferentes resistencias y usos

La relación **agua/cemento** de los morteros y hormigones proyectados se rige por las mismas leyes que para los hormigones tradicionales (**0,36-0,55**), y está fuertemente relacionada con las variaciones del módulo de finura de los áridos (**2,49** para áridos finos a **3,26** para áridos gruesos).

En el caso de la Vía Húmeda se recomienda una relación agua/cemento menor de **0,45** para que la química de los aditivos acelerantes de fraguado, funcione correctamente.

La relación agua/cemento (A/C), o agua/aglomerante (A/A) en el caso de emplear sílice coloidal o adiciones de humo de sílice, es uno de los parámetros de diseño del hormigón proyectado. Al igual que en el caso del contenido en cemento, se adjunta a modo orientativo un rango de valores de A/C en la tabla que se muestra a continuación.

Resistencia característica (MPa)	Relación A/C
25	0,45
30	0,43
35	0,41
40	0,38

Tabla 3.- Relación agua/cemento frente a resistencia característica

La principal dificultad en la determinación de la relación A/C aparece de la mano de los áridos. Si bien existen ensayos normalizados para la determinación de la humedad y coeficiente de absorción de arenas y gravas, es un hecho que se trata de medidas puntuales, con un número finito y limitado de muestras para un proceso con numerosas variables en constante cambio.

$$A/C = (\text{Agua amasado} + \text{Agua humedad áridos} - \text{Absorción agua}) / \text{Cemento}$$

Por su parte, los sistemas de control de la humedad de los áridos en la planta requieren un mantenimiento elevado que no siempre es posible realizar, dando como resultado lecturas erróneas.

Con todo ello, será posible determinar la relación A/C en las etapas de ensayo iniciales o puntualmente en ensayos de control durante la obra, pero parece difícil aproximar al segundo decimal este cociente, cuando los errores en la determinación de la humedad de los áridos por sistemas automáticos superan ese orden de magnitud.

Una vez en producción, las plantas modernas disponen de sistemas de control indirecto de la consistencia de la mezcla (resistencia al giro de la amasadora), y la experiencia del responsable de la planta será vital para detectar variaciones en el aporte de agua por parte de los áridos y hacer las correcciones necesarias.

Si la planta no dispone de amasadora, es recomendable realizar la carga con una cantidad de agua menor de la teórica estimada, añadiendo posteriormente el agua necesaria de forma controlada para ajustar la consistencia del hormigón.

En estos casos, es aconsejable realizar previamente un estudio de consistencias para relacionar el indicador de giro del tambor del camión hormigonera con el cono del hormigón.

Para ello, el estado del tambor de todas las cubas empleadas en el transporte debe ser similar y adecuado, establecer unas rpm de referencia para el tambor, y que la carga de hormigón sea siempre la misma (una presión adecuada es 60-90 bar).

De esta forma, se dispone de un sistema de control para evitar excesos de agua en la mezcla que afecten a la resistencia final del hormigón.

Una característica importante en la dosificación son los áridos y su granulometría, tanto en la vía seca como húmeda. Como norma general no se recomienda emplear tamaños superiores a 15 mm.

La experiencia se refleja en las curvas granulométricas, por lo que un ensayo preliminar de los áridos a emplear, el estudio de su granulometría y la dosificación de cemento es muy importante tanto en la vía seca, como en la húmeda, con el fin de adecuar la mezcla al equipo empleado.

Posteriormente se deberán ajustar estas dosificaciones con los aditivos y adiciones, tanto en polvo como líquidos, necesarios para el fin deseado (acelerantes, retardadores, estabilizadores, superplastificantes, etc.); rebotes, resistencias, manejabilidad, formación de polvo, impermeabilidad, etc.

3.6.3.1 Fabricación: Dosificaciones del Hormigón proyectado

Generalmente se recomienda dosificar los materiales en peso. La curva composición deberá tener una granulometría que encaje en el huso granulométrico correspondiente, normalmente 0-8 ó 0-12 mm.

La dosificación de cemento será en general de unos 400-450 kg/m³, dependiendo de las resistencias a compresión a 28 días exigidas y del tipo de cemento a emplear, pudiéndose rebajar si se emplea humo de sílice, sílice coloidal (Sikatell 200) o acelerantes libres de álcali.

Resistencia característica (MPa)	Propuesta de cantidad de cemento (kg)	
	Acelerante base aluminato	Acelerante libre de álcali
25	400	380
30	425	400
35	450	420
40	475	440

Tabla 4.- Contenidos en cemento de partida en la fase de diseño de la mezcla

En el caso de la vía húmeda, la relación agua/cemento estará comprendida entre 0,36 y 0,45 influenciada por la variación del módulo de finura de los áridos y su naturaleza, con el fin de conseguir un cono de proyección idóneo y adecuado para la máquina de proyección.

La dosificación usual de los acelerantes de fraguado es del 3-5% del peso del cemento tanto en polvo como en líquido, salvo los acelerantes a base de silicato, ya en desuso, que necesitan dosificaciones del 8-12%.

Tipo de acelerante	Dosificación (%)	Caída de R.C.S. (28 días) (%)
Base silicato	10 - 15	40 - 50
Base aluminato	3 - 6	15 - 30
Libres de álcali (AF)	3 - 8	5 - 10

Tabla 5.- Dosificaciones medias y repercusión en la resistencia del hormigón

La dosificación de los superplastificantes y estabilizadores se establecerá mediante pruebas en la misma obra, y dependerá de los áridos y del tiempo de manejabilidad.

La adición a base de humo de sílice se añadirá en una dosificación entre el 4-10% (el equivalente a un 4% de humo de sílice en sílice coloidal Sikatell 200 sería un 1%), y las cenizas volantes en un porcentaje no superior al 15-20%, dependiendo del tipo de cemento.

La preparación de la mezcla del hormigón tanto en vía seca como en vía húmeda, necesita efectuarse en una planta adecuada con mezcladora, ya que las exigencias técnicas y las

características de sostenimiento obligan a una preparación y mezcla de los componentes homogénea, sobre todo con la incorporación de adiciones y aditivos, necesarios para la aplicación del hormigón proyectado.

Planta de Hormigón con amasadora. Muchas de las causas del mal funcionamiento de los equipos de proyección, son ocasionadas por una mala mezcla en las plantas dosificadoras, sin amasadora, o por la incorporación de los aditivos y adiciones en el mismo tajo.

Influencia en:	Planta con amasadora	Dosificación directa a cuba
Homogeneidad de la mezcla	XXX	X
Control de agua	XXX	XX

Tabla 6.- Influencia del sistema de carga en la mezcla

El estudio de los áridos utilizados en la mezcla para adaptarla al huso granulométrico ideal de cada máquina y la posible corrección de los tamaños de los mismos, es un ejercicio imprescindible en el inicio de la obra, incluyendo como se ha mencionado anteriormente su densidad, humedad y el coeficiente de absorción de agua.



Foto 6.- Detalle de una planta de hormigón de obra

El orden y el tiempo de mezclado de los componentes se debe adecuar a la optimización estudiada, teniendo en cuenta el arte de preparación ideal del hormigón, con instalaciones de dosificación apropiadas.

Por otro lado, las máquinas de proyección (tanto en flujo denso como diluido) exigen una consistencia comprendida en cono de Abrams de 8 a 18 cm. (según el tipo de bomba), sin contar con la pérdida de manejabilidad por el transporte.

Por este motivo, es imprescindible disponer los medios necesarios para lograr una correcta fabricación del hormigón proyectado, y no dejar a la casualidad o a la incorporación de química complementaria la dispersión de resultados o a las opiniones contradictorias del funcionamiento del sistema.

Una “herramienta” tan utilizada en el sostenimiento de túneles y taludes, como es el hormigón proyectado, no depende de “milagros” sino que necesita instalaciones contrastadas

y bien estudiadas que permitan desarrollar una mezcla y un transporte adecuados, según las normas establecidas, para conseguir las características finales de dicho hormigón proyectado.

No se puede olvidar que un sostenimiento de un túnel o de un talud tiene además del fin constructivo, una responsabilidad en la seguridad de los equipos y de las dotaciones humanas que intervienen en la obra.

A efectos ilustrativos se especifican algunos ejemplos reales de dosificación tipo (con la “receta” de los componentes) y huso granulométrico (curva composición resultante).

Dosificación Tipo 1. Vía seca (25 MPa)

Aplicación: Estabilización de los taludes de un emboquille

CEM II 42,5 A-V	400 kg
Arena 0-4	1072 kg
Gravilla 4-12	560 kg
Agua añadida en boquilla	140 l
Acelerante libre de álcali polvo – Sigunita 49 AF (4%)	

Dosificación Tipo 2. Vía húmeda (HM 30 MPa)

Aplicación: Sostenimiento de túnel con hormigón proyectado convencional

CEM II 42,5 A-V	425 kg
Arena 0-4	1365 kg
Gravilla 4-12	430 kg
Agua amasado	178 l
Agua absorción	29 l
Aditivo Sikament T 1405 (1,8%)	7,65 kg
Acelerante aluminato líquido - Sigunita L 22 R (4%)	

Dosificación Tipo 3. Vía húmeda (HM 40 MPa)

Aplicación: Sostenimiento túnel (hormigón proyectado altas prestaciones)

CEM I 52,5 R	460 kg
Arena 0-4	1329 kg
Gravilla 4-12	418 kg
Agua amasado	184 l
Agua absorción	29 l
Aditivo Viscocrete SC 305 (1%)	4,65 kg
Sílice coloidal Sikatell 200 (1%)	4,60 kg
Acelerante libre de álcali líquido - Sigunita L 53 AFS (4%)	

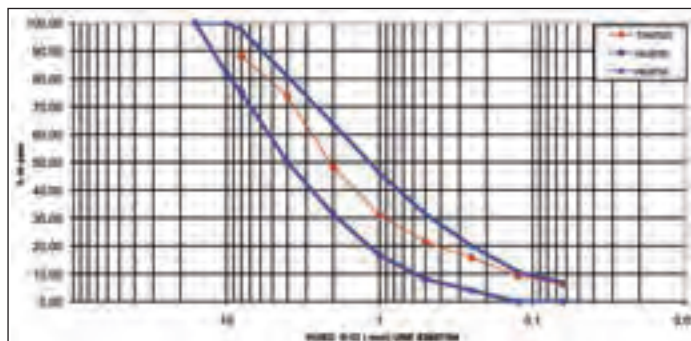


Figura 12.- Curva resultante de la dosificación Tipo 1 (vía seca)

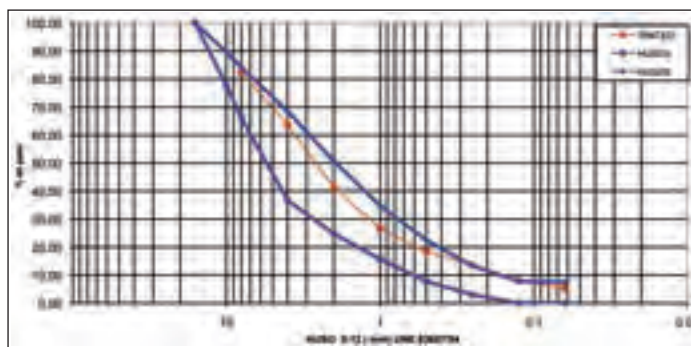


Figura 13.- Curva resultante de la dosificación Tipo 3 (vía húmeda)

3.6.3.2 Transporte

En función de la tipología de la obra (distancia, tipo de vía, sección del túnel, etc.) se debe seleccionar el medio de transporte más adecuado (camión hormigonera, torpedo sobre raíles, etc.), siendo el medio más habitual el camión hormigonera.

Tanto en la vía seca como en la vía húmeda, se deberán respetar las normas establecidas (estado y control de las aspas interiores de mezclado), no adicionar nunca agua en su recorrido, salvo en casos extremos, ya que se puede producir una reducción apreciable en las resistencias a compresión, y mantener constantemente en movimiento durante su traslado a la obra.

El tiempo de transporte total (mezclado + transporte + aplicación), se tendrá en cuenta tanto en el diseño de la dosificación, como en la validez de utilización de la mezcla de acuerdo con lo establecido en la Normativa UNE 83607-94.

Conviene efectuar un remezclado rápido durante 1 minuto por metro cúbico transportado, antes de servirse al equipo de proyección.

Si se detectase una manejabilidad inferior a la requerida por dicha máquina, se deberá corregir mediante remezclado rápido intenso en el caso de la vía seca o de la corrección del cono mediante la adición de aditivo superplastificante en el caso de la vía húmeda.

3.6.3.3 Puesta en obra

La calidad final de la gunita depende fundamentalmente de los operarios. Es esencial que éstos asistan a cursillos y reciban una formación completa de su especialidad. El encargado deberá poseer una gran experiencia, y haber trabajado como gunitador al menos durante cinco años.

El gunitador, debe por lo menos haber pasado por un aprendizaje de un año de duración, y poseer experiencia en trabajos de naturaleza semejante. La experiencia del gunitador deberá probarse, para ello, se ensayará con un revestimiento de paneles de prueba como parte del programa de ensayos previos a la construcción.

Antes de comenzar el trabajo es fundamental definir las instalaciones, ya que éstas servirán de base al funcionamiento posterior y al buen resultado del sistema.



Foto 7.- Robot de gunitado Sika PM 500. Proyección de talud de emboquille

También es muy importante elegir correctamente las zonas de acopio de los aditivos acelerantes de fraguado, la ubicación y distancia de la planta de mezclado (influye directamente en la fase de transporte), así como la colocación del propio robot en el túnel para cubrir el pase en abanico cumpliendo con las distancias de proyección recomendadas.

Técnicas de Ejecución

Las técnicas de ejecución que se van a detallar a continuación, son producto de la experiencia de muchos años de trabajo en el hormigón proyectado, y se recomienda su uso con el fin de unificar criterios y métodos.

Por lo general, el gunitador trabajará de abajo arriba, rellenando las armaduras y cuadros de tal manera que queden completamente embebidas en el hormigón evitando la aparición de arenas sueltas detrás de estos. También colocará las señales, guías o maestras necesarias para llegar al espesor previsto.

El gunitador debe dirigir al maquinista mediante señales con la mano respecto a la producción y la velocidad del suministro en la tolva de alimentación. Si éste es demasiado fuerte, la presión deberá disminuirse así como el caudal de hormigón, con el fin de mejorar la proyección.

Es importante facilitar a los operarios las características de la maquinaria a emplear, que suele suministrar el fabricante, así como las recomendaciones que cubren todas las combinaciones en caso de duda.

Preparación de superficies - Todo tratamiento de hormigón proyectado necesita una preparación de las superficies soporte. Esta preparación se puede realizar con un chorro de aire a presión, chorro de aire y agua a presión o chorro de agua a alta presión con el mismo robot. Como norma general se deberán retirar los restos de materiales sueltos que estén sobre el soporte, evitando la creación de falsas zonas que no adhieran al revestimiento posterior. Se recomienda hacer siempre la preparación de superficies mediante humectación del soporte para evitar pérdidas de cohesión en el soporte por el fraguado del hormigón.

Colocación de armaduras - Los sistemas normalmente utilizados de fijación de mallas se pueden denominar como fijaciones ligeras. En los casos de obras de Ingeniería Civil, como túneles, muros y taludes se hace necesario la fijación por medio de sistemas pesados, como son bulones, barras, anclajes, etc.

En el caso de que dos o más capas de armadura vayan a ser gunitadas, la capa externa no se debe asegurar directamente sobre la capa interna, sino que debe ser escalonada de manera que permita a la cara interna ser proyectada sin interferencia.

Proyección - Una vez elegido el tipo de máquina, así como el diámetro de las mangueras de proyección, el funcionamiento será el siguiente:

1º Comprobar las mangueras de proyección para ver si están limpias, para lo cual, se conectan a un compresor que disponga de un manómetro. Si éste mostrara una presión superior a la normal significará que las mangueras están sucias o taponadas.

En este caso deberán limpiarse doblándolas, torciéndolas o golpeándolas suavemente con un martillo, volviendo a dar aire y expulsando así el material que pueda estar obstruyendo la manguera.

2º Conectar las mangueras formando el menor número posible de curvas y a ser posible sin ningún rizo, asegurando las uniones entre mangueras.

3º Comprobar la salida del agua o del aditivo acelerante, para los casos de vía seca o húmeda respectivamente, así como el funcionamiento de las bombas dosificadoras del aditivo acelerante de fraguado en el caso de que se utilicen.

Esta comprobación se realizará quitando la tobera de la boquilla y desatrancando si es preciso los inyectores de agua o de aditivo acelerante, con la boquilla siempre hacia abajo para prevenir que la corriente de agua o de aditivo acelerante vuelva hacia atrás por la manguera.

4º Con la bomba de hormigón en marcha y la tolva llena de agua junto con la bomba del aditivo acelerante se dará entrada al aire comprimido exclusivamente, examinando el abanico que forma la pistola, viendo inmediatamente si existe algún fallo de suministro en los inyectores.

Si el abanico es débil quiere decir que no hay suficiente presión de aire, en este caso, se incrementaría la misma. Una vez pasada esta operación, el gunitador está preparado para comenzar el trabajo.

La primera operación será la de proyectar una mezcla de aire y agua sobre el soporte, a fin de humedecer la superficie. Esta práctica es recomendable para todo tipo de sopor-

te, hormigón, madera, arpillera, roca, tierra o acero. La manguera está ahora conectada con la boquilla y la gunitadora, y la proyección puede comenzar.

El gunitador mantendrá la boquilla (pistola) hacia abajo, en espera del suministro de la mezcla. Cuando la mezcla llegue regulará rápidamente el suministro y dirigirá el chorro al soporte al revestir.

La distancia entre el soporte y la boquilla o pistola estará situada entre **0,6 y 1,5 m**, moviendo la boquilla rítmicamente en series de rizos de lado a lado y de arriba abajo, con el fin de trabajar de modo uniforme.

En el caso de que se produzca cualquier irregularidad en el suministro de la mezcla, el gunitador deberá dirigir la boquilla fuera de la zona de trabajo, hasta que la alimentación vuelva a ser normal.

Si el chorro disminuye de repente, indica una obturación parcial o una avería en la boquilla. En el caso de que el abanico de agua se haga desigual, el trabajo se debe parar y limpiar o cambiar la parte afectada (inyectores).

Conseguida una uniformidad de proyección, el desarrollo del trabajo está ahora en manos del gunitador, que debe dirigir constantemente al maquinista, para que regule el abastecimiento, aumentando o reduciendo tanto la presión, como la velocidad.

Al terminar el trabajo se deberán limpiar perfectamente las mangueras y la máquina, para lo cual se cortará el suministro de la mezcla y se dejará el aire comprimido salir libremente por la manguera, doblando ésta antes de la boquilla, disparando de vez en cuando la cantidad de aire para que se limpie en todo su recorrido.

Cuando la proyección se hace en vertical, es decir, el soporte está por encima de la boquilla, las mangueras deben vaciarse antes de parar el trabajo, ya que si no se hace así la mezcla caerá al fondo al quedar sin presión, y no será posible moverla.

En este tipo de trabajos es muy conveniente disponer de un doble juego de mangueras, ya que en el caso de una obturación se puede inmediatamente disponer de otra paralela de repuesto.

Rechazo o rebote - El rechazo es la pesadilla del gunitador y del proceso, supone un coste muy elevado en la ejecución de un túnel. Un gunitador que haya aprendido a controlar el rebote es muy difícil de encontrar.

El rebote está formado por los componentes que no se adhieren a la capa de gunitado o a las armaduras, y que salen rebotados.

La proporción inicial de rebote es alta cuando el chorro de mezcla se dirige directamente al soporte, y también cuando se dirige sobre la armadura, pero la formación de una capa amortiguadora sobre el soporte reduce dicha cantidad.

Por ello, los espesores gruesos tienen una menor proporción de rebote y las capas delgadas tienen los porcentajes de rechazo más altos.

Una aplicación correcta según las prácticas del arte de gunitar tiene una importancia fundamental, por lo que insistimos en que la correcta aplicación y la geometría debe ser la adecuada.

Para el cálculo del rebote existen muchas teorías, tanto prácticas como analíticas ya que desde un punto de vista económico tiene mucha importancia.

En lo que a pérdida de materiales se refiere, el fenómeno de rebote tiene una importancia relativa, pero su peso se multiplica si se considera el rendimiento del equipo de colocación, y el resto de costes derivados (tiempos muertos, desescombro, consumibles, horas-hombre, etc.), llegando a convertirse en un aspecto clave en la optimización económica de la labor.

El porcentaje de rechazo, en cualquier punto y situación, depende entre otros factores de:

- Relación agua/cemento
- Proporción de la mezcla
- Gunitador
- Tipo de áridos (>Árido grueso = más rebote)
- Eficacia de la hidratación
- Presión del agua o del aire
- Diseño de la boquilla
- Velocidad de la proyección
- Capacidad del compresor
- Tamaño de la boquilla
- Angulo y distancia del impacto

Existen estudios analíticos que pueden complementar estas teorías como:

- ▲ Curvas de LINDER
- ▲ Curvas de DROGSLER

Basandonos en nuestra experiencia, podemos establecer los siguientes valores a modo orientativo:

Superficie soporte	Porcentaje % Vía seca	Porcentaje % Vía húmeda
Soleras	5 - 10	2 - 5
Hastiales	15 - 30	5 - 10
Bóvedas	25 - 40	10 - 15

Tabla 7.- Porcentajes medios de rechazo

Sí este rebote se almacena o cae en el propio hormigón proyectado, el resultado es la formación de bolsas de rechazo (mortero débil), que ocasiona fisuras en el revestimiento.

La reducción del rebote es una consideración muy importante para tenerla en cuenta, para lo cual se pueden utilizar adiciones o aditivos tales como **Sikafume S92D** o **Sikatell 200**.

Curado - El curado de la gunita es importante en espesores delgados. Para ello, se recomienda que la superficie terminada se mantenga continuamente mojada por lo menos durante los 7 días siguientes a la proyección.

3.6.3.4 Equipos de maquinaria

Los equipos de gunitado, tanto de vía seca como de vía húmeda, hoy en día disponen de los procedimientos más avanzados y se complementan con módulos autónomos (unidades completas de trabajo), que disponen de todos los servicios complementarios para el hormigón proyectado (aire comprimido, energía eléctrica, bombas de agua, dosificadores, cintas transportadoras, carro móvil y brazo hidráulico).

De esta forma, se consigue una versatilidad de movimientos para el desarrollo de cualquier trabajo. Se distinguen tres tipos de máquinas para la proyección por vía seca (flujo diluido):

*** Sistema de dos cámaras * Sistema de tornillo * Sistema de rotor**

Existen actualmente en el mercado más de 30 modelos de equipos diferentes para este empleo.

En cuanto a las máquinas para la proyección por vía húmeda, se distinguen tres tipos, por Flujo Diluido y Flujo Denso:

*** Sistema rotor * Sistema tubo flexible * Sistema de émbolos**

Existen igualmente en el mercado actual más de 40 modelos diseñados para este fin.



Foto 8.- Detalle de un robot Sika PM 500 en la Feria SMOPYC

3.6.3.5 Formación de polvo y aerosoles

En el proceso de proyección del hormigón tanto en la vía seca como en la vía húmeda se genera polvo y partículas en suspensión. En este sentido, existe una diferencia considerable a favor de la vía húmeda ya que produce menos polvo que la vía seca.

En líneas generales, es un problema de humectación de la mezcla, que se puede resolver convenientemente en el caso de la vía seca con la utilización de la variante conocida como vía semihúmeda.

En todo caso, se deberá ventilar convenientemente la obra y tender hacia procesos de vía húmeda para mantener las condiciones de Salud e Higiene en el trabajo.

Existen aditivos para la vía seca basados en celulosa que reducen considerablemente la formación de polvo, pero encarecen considerablemente el precio final.

Los productos **Sika** basados en el humo de sílice confieren a la mezcla de los hormigones proyectados unas cualidades importantes que benefician a la disminución de rebote y que proporcionan una manejabilidad adecuada al fin perseguido, además de las ventajas de

reacción con la cal libre del cemento, consiguiéndose hormigones más resistentes a los esfuerzos físicos así como a los ataques químicos y atmosféricos, con el consiguiente aumento del grado de durabilidad.

Para mayor información sobre este tema, se cuenta con una publicación del **Dr.-Ing. Dieter Handke**, sobre “**Reducción de la formación de polvo, durante los trabajos de Hormigón proyectado en Túneles**”, investigaciones llevadas a cabo bajo el patrocinio del Departamento de Operaciones y Tecnología de la Construcción de la Universidad del Ruhr en Bochum, Alemania.

Esta publicación analiza todas las operaciones en la proyección por vía seca y húmeda, desde la mezcla hasta la aplicación, dando recomendaciones y resultados relativos al uso y técnicas de aplicación dependiendo del contenido de cemento, la longitud y el tamaño de la boquilla, y la cantidad de aire comprimido.

3.6.4 Criterios de consumo y mediciones

Las reglas de juego, en cuanto a consumos y métodos de medición, son realmente diferentes en comparación con los sistemas tradicionales en hormigón convencional.

En la vía seca y semihúmeda 1 m³ de hormigón corresponde a la mezcla de 1.000 litros de áridos (tomando la densidad aparente), junto con unos 400 kg de cemento.

En lo que respecta a la vía húmeda, la dosificación se realiza de forma similar al caso de un hormigón tradicional. En ambos casos, los consumos de proyección se tendrán en cuenta la compactación de proyección y el rebote.

En líneas generales, es muy importante a la hora del cálculo de consumos de materiales, tener en cuenta los valores de materiales a consumir por m² y cm de espesor, por vía seca o húmeda, ya que independientemente de los precios unitarios de aplicación (m³), siempre se referirán a m² aplicado.

Los valores del rebote, o materiales perdidos, dependen de la profesionalidad de los especialistas de aplicación.

Las mediciones de gunita aplicada, representan en toda obra subterránea un capítulo importante a la hora de las reclamaciones, debido a la falta de definición del espesor, ya que los soportes excavados en túnel son muy difíciles de controlar.

Con carácter informativo, se incluyen a continuación los diferentes criterios de medición para incluir en un Proyecto de obra subterránea.

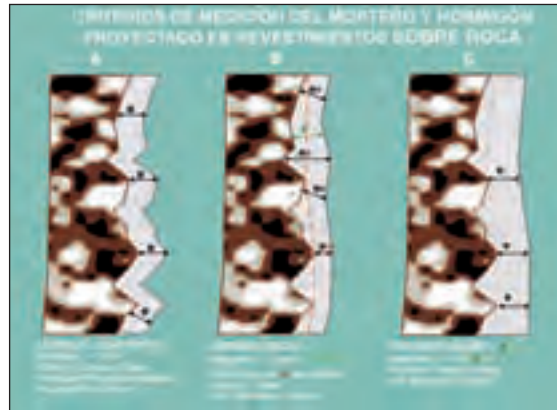


Figura 14.- Criterios de medición de espesores

3.6.5 Dosificaciones tipo y parámetros de trabajo

Estas dosificaciones, características y rendimientos aproximados, son orientativas y están basados en la experiencia de numerosas obras realizadas en taludes y túneles a lo largo de más de 50 años en España. Sin embargo pueden ayudar en las fases iniciales y en muchos casos resolver cálculos de costos y planificación de obras.

Una serie de ensayos previos considerando: Áridos y su granulometría, cemento y su tipo, resistencias iniciales y finales, capacidad de producción y tiempo de transporte, será necesaria para optimizar los costes y los resultados técnicos exigidos.

HP25: Resistencia a Compresión a 28 días: 25 MPa

C: Cantidad de cemento por m³

G: Granulometría de los áridos

R: Rendimiento

N: H.P. Normal

F: H.P. con adición de fibras

AF: H.P. acelerantes libres de álcali

H: H.P. con adición de humo de sílice

P: H. P. polimérico

E: H. P. estabilizado

RM: H. P. con bajo rechazo

AR: H. P. de altas prestaciones

Los hormigones proyectados más utilizados en la realización de trabajos de Ingeniería Civil y Edificación actualmente son:

V.Seca HP 25/C=380 kg/G=0-6 mm/R=1 m³/h/F/AF

(Hormigón proyectado armado de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-6 mm., con una dosificación de 380 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de áridos y con acelerante libre de álcali en polvo)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	380 kg
Arena 0-6 mm	1.700 kg
Humedad áridos	< 3%
Adiciones fibra metálica	30 kg / Fibras sintéticas:Sika Fiber T48 5 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante **Sigunita 49AF** 12-15 kg

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	12 m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	4 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, 0,2 – 4,0 m³/h

Usos: Reparaciones, capas de sellado, revestimientos libre de álcali

V.Seca HP 30/C=400 kg/G=0-6 mm/R=1 m³/h/H/AF

(Hormigón proyectado de Rc=30 MPa a los 28 días, con áridos 0-6 mm, con una dosificación de 400 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de áridos, con humo de sílice y acelerante libre de álcali en polvo)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	400 kg
Arena 0-6 mm	1.700 kg
Humedad áridos	< 3%
Adiciones: Sikafume S92D	16-32 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante: Sigunita 49 AF	12-15 kg
-----------------------------------	----------

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	12 m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	4 kW

Rendimientos medios:30 litros/m²/cm, 0,2 – 4,0 m³/h**Usos:**

Reparaciones alta resistencia y durabilidad, capas de sellado, Revestimientos

V.Seca HP 25/C=400 kg/G=0-12 mm/R=6 m³/h/N

(Hormigón proyectado de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm, con una dosificación de 400 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de áridos, con acelerante aluminato líquido)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	400 kg
Arena 0-6 mm	1.100 kg
Gravín 6-12 mm	600 kg
Humedad áridos	< 3%

Aditivo en máquina:

Acelerante líquido Sigunita L-26R	14-16 kg
--	----------

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	16 m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	10 kW
Rendimientos medios:	30 litros/m ² /cm, 3,5-11,0 m ³ /h

Usos:

Sostenimientos de túneles, taludes, capas de sellado, revestimientos, aplicación robotizada

V.Seca HP 25/C=380 kg/G=0-12 mm/R=6 m³/h/F/AF

(Hormigón proyectado de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm, con una dosificación de 380 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de áridos, armado con fibras y acelerante libre de álcali en polvo ó líquido)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	380 kg
Arena 0-6 mm	1.100 kg
Gravín 6-12 mm	600 kg
Humedad áridos	< 3%
Adiciones: Fibras metálicas	30 kg / Fibras sintéticas: Sika Fiber T48 5 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante polvo Sigunita 49AF	12-15 kg
Acelerante líquido Sigunita L-53AFS	12-15 kg

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	16 m³/min, mínimo
E. Eléctrica	10 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, 3,5-11,0 m³/h

Usos: Sostenimientos de túneles, taludes, capas de sellado, revestimientos, aplicación robotizada

V.Seca HP 30/C=400 kg/G=0-12 mm/R=6 m³/h/H

(Hormigón proyectado Rc=30 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm., con una dosificación de 400 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de árido y humo de sílice)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	400 kg
Arena 0-6 mm	1.100 kg
Gravín 6-12 mm	600 kg
Humedad áridos	< 3%
Adiciones: Humo de sílice: Sikafume S92D	16-32 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante polvo Sigunita R	12-16 kg
Acelerante líquido Sigunita L-26R	16-18 kg

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	16 m³/min, mínimo
E. Eléctrica	10 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, 3,5-11,0 m³/h

Usos: Revestimiento de túneles, robotizados

V.Seca HP 35/C=400 kg/G=0-12 mm/R=6 m³/h/F/AF/ARP

(Hormigón proyectado de altas prestaciones de Rc=35 MPa a 28 días, con áridos 0-12 mm., con una dosificación de 425 kg de cemento CEM I 42,5, por cada 1.000 litros de áridos, con humo de sílice y acelerante libre de álcali)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5	425 kg
Arena 0-6 mm	1.100 kg
Gravín 6-12 mm	600 kg
Humedad áridos	< 3%
Adiciones: Fibras sintéticas Sika Fiber T48	5 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante polvo Sigunita 49AF	15-17 kg
Acelerante líquido Sigunita L-53AFS	16-18 kg

Maquinaria:

Aliva	
Compresor	16 m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	10 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, 3,5-11,0 m³/h

Usos: Revestimientos de reparación de túneles, Impermeabilización, Nuevo sistema Oberhasli

V.Húmeda HP 25/C=400 kg/G=0-12 mm/R=14 m³/h/N

(Hormigón proyectado de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm, con una dosificación de 400 kg de cemento CEM I 42,5 R por m³ y con acelerante líquido)

Dosificación base:

Cemento CEM I 42,5R	400 kg
Arena 0-6 mm	1.400 kg
Gravín 6-12 mm	400 kg
Relación a/c	0,43

Aditivo en planta:

Superplastificante Sikament T-1405	6-8 kg
---	--------

Aditivo en máquina:

Acelerante Sigunita L-22 R	16 kg
-----------------------------------	-------

Maquinaria:

Sika-PM	
Compresor	21m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	30 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, máx. 20 m³/h

Usos: Sostenimiento de túneles, revestimientos, aplicación robotizada

V.Húmeda HP 25/C=380 kg/G=0-12 mm/R=14 m³/h/AF

(Hormigón proyectado de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm., con una dosificación de 380 kg de cemento CEM I 52,5R, por m³ y con acelerante libre de álcali)

Dosificación base:

Cemento CEM I 52,5R	380 kg
Arena 0-6 mm	1.400 kg
Gravín 6-12 mm	400 kg
Relación a/c	0,43

Aditivo en planta:

Superplastificante Sikament T-1405	5,5-7,5 kg
---	------------

Aditivo en máquina:

Acelerante Sigunita L-53AFS	16-18 kg
------------------------------------	----------

Maquinaria:

Sika-PM	
Compresor	21m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	30 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, máx. 20 m³/h

Usos: Sostenimiento de túneles, revestimientos, aplicación robotizada

V.Húmeda HP 25/C=400 kg/G=0-12 mm/R=14 m³/h/F

(Hormigón proyectado armado con fibras de Rc=25 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm, con una dosificación de 400 kg de cemento CEM I 52,5R por m³ y acelerante líquido)

Dosificación base:

Cemento CEM I 52,5R	400 kg
Arena 0-6 mm	1.400 kg
Gravín 6-12 mm	400 kg
Relación a/c	0,43

Aditivo en planta:

Superplastificante Sikament T-1405	6-8 kg
---	--------

Adiciones en planta:

Fibra metálica: 30 kg / Fibra sintética **Sika Fiber T48** 5 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante Sigunita L-22 R	16 kg
-----------------------------------	-------

Maquinaria:

Sika-PM	Tipo 702
Compresor	21m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	30 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, máx. 20 m³/h

Usos: Sostenimiento túnel, revestimientos, minería, aplicación robotizada

V.Húmeda HP 30/C=425 kg/G=0-12 mm/R=14 m³/h/H/E/AF

(Hormigón proyectado de Rc=30 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm., con una dosificación de 425 kg de cemento CEM I 52,5R por m³ con humo de sílice y estabilizador)

Dosificación base:

Cemento CEM I 52,5R	425 kg
Arena 0-6 mm	1.400 kg
Gravín 6-12 mm	400 kg
Relación a/c	0,43

Aditivo en planta:

Superplastificante **Viscocrete SC 305** o **Viscocrete 5980** (0,9%) 3,8 kg

Adiciones en planta:

Humo de sílice Sikafume S92D	16-32 kg o Sikatell 200 (1%) 4,25 kg
Estabilizador: Sikatard 930	1,2 – 3,6 kg

Aditivo en máquina:

Acelerante Sigunita L-53 AFS	16 kg
------------------------------	-------

Maquinaria:

Sika-PM	
Compresor	21m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	30 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, máx. 20 m³/h

Usos: Revestimiento de túneles, aplicación robotizada

V.H. HP 35/C=440 kg/G=0-12 mm/R=14 m³/h/AF/AR

(Hormigón proyectado de altas prestaciones de Rc=35 MPa a los 28 días, con áridos 0-12 mm, con una dosificación de 440 kg de cemento CEM I 52,5R por m³ con humo de sílice y acelerante libre de álcali)

Dosificación base:

Cemento CEM I 52,5R	440 kg
Arena 0-6 mm	1.400 kg
Gravín 6-12 mm	400 kg
Relación a/c	0,43

Aditivos en planta:

Superplastificante **Viscocrete SC 305** o **Viscocrete 5980** (0,9%) 4 kg

Adiciones en planta:

Humo de sílice Sikafume S92D	16-32 kg o Sikatell 200 (1%) 4,4 kg
-------------------------------------	--

Aditivo en máquina

Acelerante Sigunita L-53AFS	18 kg
------------------------------------	-------

Maquinaria:

Sika-PM	
Compresor	21m ³ /min, mínimo
E. Eléctrica	30 kW

Rendimientos medios: 30 litros/m²/cm, máx. 20 m³/h

Usos: Reparación, sostenimiento y revestimiento túnel, aplicación robotizada

3.7 Comparativa de sistemas de proyección

Vía seca / Vía Húmeda: Ambos sistemas presentan aún hoy sus ventajas e inconvenientes. Como información es importante resaltar que en España el porcentaje de utilización es del **5 % de Vía seca** y **95 % de Vía Húmeda**.

VIA SECA

- En la boquilla se tiene el control del agua y de la consistencia de la mezcla
- Permite mayor longitud de tubería o manguera de trabajo
- Se adapta perfectamente para la utilización de robots de proyección
- El equipo es menos voluminoso y más económico que el de la vía húmeda
- Se adapta perfecta y rápidamente a las necesidades de la obra, sin limitación por fraguado de la mezcla
- El sistema produce más polvo que la vía húmeda
- Los aditivos se añaden en tolva o en boquilla en polvo o líquido respectivamente
- Velocidad de proyección alta (80-100 m/s)

VIA HÚMEDA (Flujo denso)

VENTAJAS

- Gran capacidad de producción
- Poco consumo de aire comprimido
- Distancias grandes de proyección
- Menor rebote que vía seca

INCONVENIENTES

- Inversión fuerte y gran dimensión de máquina
- Necesidad de consistencia para bombeabilidad
- Baja formación de polvo
- Más operaciones de limpieza necesarias
- Perdidas de material por limpieza

VIA HÚMEDA (Flujo diluido)

VENTAJAS

- Equipo compacto y más barato
- Mayor rango de manejabilidad
- Menor operación de limpieza
- Sin pérdidas de mezcla
- Menor consumo de cemento

INCONVENIENTES

- Baja capacidad
- Gran necesidad de aire comprimido
- Menor distancia de proyección (50-60 m máx.)
- Mayor formación de polvo
- Más rebote

TABLA COMPARATIVA	SISTEMAS DE HORMIGÓN PROYECTADO	
	VÍA SECA	VÍA HÚMEDA
UNIDAD	VÍA SECA	VÍA HÚMEDA
Cantidad	m ³ mezcla seca: 1650 kg	m ³ hormigón: 2300 kg
Transporte	Flujo diluido	Flujo diluido / denso
Manejo boquilla	Manual / Brazo	Brazo Hidráulico
Rendimiento	3-9 m ³	8-25 m ³
Rendimiento por equipo	30 m ³	80 m ³
Corresponde a una superficie (espesor 10 cm)	170 m ²	700 m ²
Avance en túnel 10 m de diámetro (espesor 10 cm)	6 m	25 m
Formación de polvo	Elevada	Reducida
	Rebote	Túnel Convencional
H. Proyectado Normal	20-40%	25-40%
H. Proyectado Alta Calidad	15-25%	15-20%
	Rebote	Túnel Fresado
H. Proyectado Normal	15-25 %	15-20%
H. Proyectado Alta Calidad	8-12 %	8-10%

Tabla 8.- Comparativa de sistemas de hormigón proyectado

3.7.1 Acelerantes libres de álcali (AF)

En el momento actual, se está produciendo en España el cambio hacia aditivos libres de álcali (álcali free) frente a los tradicionales acelerantes de base aluminato.

Este proceso de cambio ya se ha producido en los países de nuestro entorno (Francia, UK, Alemania, Suiza, etc.), y en muchos de ellos, únicamente está permitido el uso de acelerantes libres de álcali, estando restringido el uso tanto de silicatos como de aluminatos.

En una situación similar a España se encuentra Italia, Grecia y Portugal, donde el uso de acelerantes con pH altos aún está permitido y el uso de acelerantes AF es cada vez mayor.

En los últimos años, las inversiones en I+D+i han permitido el desarrollo de nuevas tecnologías y productos capaces de satisfacer las necesidades del mercado.

Los nuevos acelerantes libres de álcali permiten trabajar en muchos casos a dosificaciones similares a la de los acelerantes de base aluminato (3-4%), mientras que los primeros productos AF de esta línea obligaban a emplear dotaciones de 8-10% con el consiguiente incremento de coste y problemas de mezclado en el difusor de la boquilla.

Existe una serie de ventajas que propician este cambio. Los acelerantes tradicionales tienen un pH básico mayor de 13, frente al pH 3,5 de los libres de álcali, según se representa en la figura que se muestra a continuación.

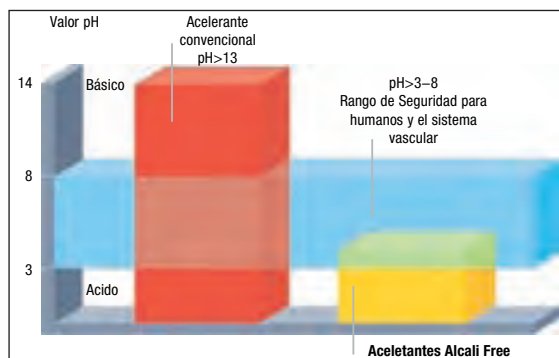


Figura 15.- Comparativa de pH entre acelerantes de base aluminato y AF

Mejora las condiciones de trabajo:

Debido a su bajo pH no se forma niebla cáustica durante la proyección, evitando daños en la piel, ojos y mucosas

Respetuoso con el Medio Ambiente:

No se derraman partículas con altos contenidos alcalinos en el suelo ni en el drenaje principal de la labor.

Facilita la manipulación:

Los acelerantes libres de álcali no son peligrosos durante las labores de transporte, almacenaje y dosificación (no son materiales ADR).

Incrementa la calidad final del hormigón:

Minimiza el efecto sobre el hormigón final endurecido, reduciendo su permeabilidad y aumentando su durabilidad.

Optimiza el mantenimiento:

Los aditivos acelerantes de fraguado libres de álcali no contienen hidróxidos alcalinos solubles, los cuales son en parte, responsables de los elevados valores del pH del flujo de agua que discurren por las tuberías de drenaje y que se vierten en los ríos.

Por este motivo, con su empleo disminuye el riesgo de precipitados en los drenajes y los costes del mantenimiento durante el tiempo de servicio.

Se han ensayado paneles de hormigón simulando el proceso de lavado de la superficie por aguas filtradas, para evaluar el pH obtenido con agua retenida, agua lavando la superficie de hormigón una sola vez, y agua que pasa dos veces lavando dichas superficies.

En todos los casos el pH del agua en contacto con la muestra elaborada con acelerante AF alcanza un pH menor.

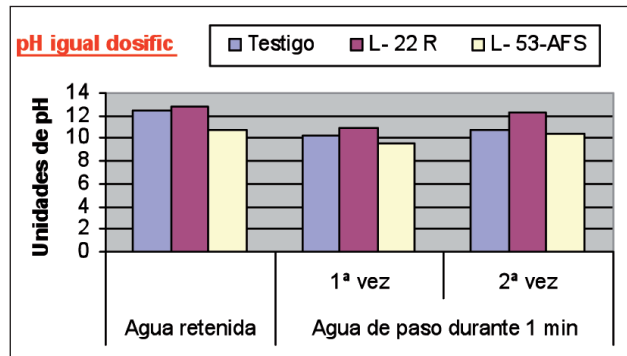


Figura 16.- Lavado de superficies de hormigón con distintos acelerantes

Reducción de otros costes:

Como se alcanza un pH menor en las aguas, el consumo de agentes (HCl, etc) para equilibrar su pH será menor en los tratamientos a la salida del túnel antes de su vertido a cauces naturales.

Gama de soluciones Sika libres de álcali:

- **Sigunita 49 AF** acelerante polvo de fraguado para vía seca
- **Sigunita L 72 AF** acelerante líquido de fraguado para vía húmeda
- **Sigunita L-53 AFS** acelerante líquido de fraguado para vía húmeda de altas prestaciones

Cabe recordar en este punto, que la hidratación del cemento es una reacción química, que depende de la temperatura de la mezcla, por lo que es indispensable aumentar la cantidad de acelerante cuando las temperaturas de la mezcla son bajas.

Los valores exigidos de resistencia inicial no tienen en cuenta dicha temperatura, por lo que un aumento en la dosificación del acelerante de fraguado de base aluminato supondría una importante disminución de las resistencias finales exigidas. En estos casos los acelerantes libres de álcali presentan una alternativa rentable.

Estas consideraciones muestran que es absolutamente indispensable elegir un procedimiento sistemático para la elaboración del hormigón proyectado. Actualmente, la realización de hormigón proyectado se ve afectada fundamentalmente en las obras subterráneas por:

- Sistema de proyección
- Operarios especialistas
- Equipos de Proyección
- Resistencias iniciales y finales
- Rebote
- Temperatura
- Formación de polvo
- Resistencia Medioambiental

3.8 Referencias

En este apartado aportamos varios artículos de referencias importantes en cuanto a realizaciones de hormigón proyectado por vía húmeda y seca en obras ejecutadas en España.

Túneles Ferrocarril Alta Velocidad Madrid Sevilla Tr. Adamuz-Villanueva

Los 9 túneles que forman parte del tramo fueron excavados por el método NATM con un sostenimiento provisional a base de hormigón proyectado con fibras Dramix de 5 a 15 cm. de espesor medio por el sistema de proyección por vía seca.

La obra se adjudicó y fue realizada por la U.T.E Entrecanales y Tavora, Dragados y Construcciones, y Comsa.

Los túneles tenían una sección de excavación de 100 m² y una sección de revestimiento terminado de 75 m² (espesor 30 cm).

Las longitudes de estos túneles son las siguientes:

1. Cortijo	321 m
2. Piedras del Aire	306 m
3. Alto del Acebucho	450 m
4. Escribano	260 m
5. Churreteles Bajos	565 m
6. Churreteles Altos	485 m
7. Valle	2.550 m
8. Piedras de la Sal	1.638 m
9. Piedras Blancas	290 m
Total:	6.865 m

El procedimiento de proyección por vía seca fue realizado por medio de máquinas **ALIVA 260** con brazos hidráulicos de proyección **ALIVA MATIC**, con una dosificación de 400 kg de cemento por m³ de mezcla seca, y con adición de **SIGUNITA R** en porcentajes del 4-5 % del peso de cemento.

La excavación de los túneles comenzó en Enero de 1.988 y terminó en Diciembre de 1.991.

Revestimiento de hormigón proyectado en los túneles de Parpers (Mataró) en la Autovía de circunvalación B-40 de Barcelona

La colaboración en España entre Sika y Aliva ha llevado a obtener un hormigón proyectado por vía húmeda de alta calidad durante la construcción de un doble túnel de 2 km de longitud en el primer tramo de la nueva autovía de circunvalación B-40, la cual tiene 2 carriles por sentido de circulación.

Una vez realizados distintos ensayos iniciales con diferentes mezclas y dosificaciones de hormigón, se obtuvieron unos resultados sorprendentes, alcanzándose unos valores de resistencias iniciales de 3-3,5 MPa ¡a las 2 horas!

Los Túneles de Parpers fueron ejecutados por FCC (Fomento de Construcciones y Contratas). El proyecto de la obra fue realizado por Geocontrol para GISA (Gestión de infraestructuras, S.A.) que depende del Gobierno de la Generalitat de Cataluña y cuya responsabilidad es la construcción de carreteras y vías en Cataluña.

Dichos túneles componen el primer tramo de un cuarto anillo de circunvalación alrededor de Barcelona situado a una distancia de alrededor de 30-40 km de la ciudad.

El proyecto contemplaba la finalización de este primer tramo entre las ciudades de Mataró y Granollers a principios de 1995, mientras que la totalidad de dicho cinturón se encontrará funcionando en el año 2010.

Los túneles tienen una cobertura de 160 m y atraviesan un terreno de granito de buena calidad en la zona costera catalana. FCC inició los trabajos de excavación en los túneles en Junio de 1993 empleando para ello perforación y voladura en las cuatro bocas, trabajando en ambos frentes de excavación alternativamente.

En primer lugar se procedió a la excavación de la sección de avance de unos 60 m² de los 100 m² de sección total de cada túnel. Posteriormente se procedió a la excavación de los 40 m² de sección de destroza.

Como parte de una nueva filosofía en el diseño, los túneles se terminaron con una capa fina de revestimiento de hormigón proyectado, introduciéndose por primera vez en España el hormigón proyectado por vía húmeda.

Este revestimiento final con hormigón proyectado reduce el coste de la obra civil del túnel significativamente, a la vez que se incrementan las especificaciones técnicas que deberá cumplir dicho hormigón proyectado.

El sostenimiento primario de la sección de avance de 60 m² con 20 m de perímetro se realiza mediante un bulonado sistemático con 11 pernos de 3 m de longitud cada uno, anclados al terreno con hormigón proyectado armado con fibra de acero de 3-5 cm de espesor.

Una vez finalizado el avance y comenzada la destroza, se aplicó la capa de revestimiento final. Dicha capa está formada por un mallazo electrosoldado de 150 mm x 150 mm x 6 mm de diámetro, recubierto con una capa final de hormigón proyectado de 7-9 cm de espesor, hasta completar un espesor final de 12 cm de hormigón proyectado.

Especificaciones del hormigón proyectado

Debido a las elevadas solicitaciones a las que estará sometido el hormigón proyectado, el cual actúa a la vez como capa de sostenimiento y como capa de revestimiento, sus especificaciones técnicas y requerimientos fueron muy exigentes.

El proyecto realizado por Geocontrol incluía por primera vez en España la utilización del hormigón proyectado por vía húmeda.

Mediante este sistema de proyección, se reducen los problemas de formación de polvo asociados con el sistema de proyección por vía seca, se reducen igualmente los porcentajes de rebote hasta unos valores medios próximos al 10%, y mediante la introducción de nuevos aditivos en el hormigón se superan las elevadas especificaciones existentes en cuanto a las resistencias iniciales del hormigón proyectado.

El Pliego de Condiciones de la obra exige los siguientes requerimientos de resistencias a compresión del hormigón proyectado: Resistencia a compresión de 11 MPa a 3 días, 17 MPa a 7 días, 25 MPa a 28 días y 25 MPa a 90 días.

Los ensayos realizados muestran que se obtuvieron resultados de resistencia a compresión de

3-3,5 MPa a las 2 horas, así como una resistencia media a compresión de 32 MPa a los 28 días llegándose incluso a alcanzar valores de 40 MPa de resistencia a los 28 días.

Para cumplir con las especificaciones existentes, al inicio de la obra se realizaron diferentes ensayos con distintas dosificaciones de hormigón. Todos los áridos utilizados, incluida la arena, se obtienen mediante machaqueo.

Por otro lado, el tamaño máximo de los áridos no supera los 12 mm. El cono en el momento de la proyección debe estar comprendido entre 10 y 16 cm y la relación agua/cemento de la mezcla definitiva de hormigón es de 0,48.

Los mejores resultados se consiguieron con una dosificación de 400 kg de cemento por m³ de hormigón, adicionando 16 kg de humo de sílice por m³ de hormigón, 20 kg de fibra de acero por m³ de hormigón, además de otros dos tipos de aditivos:

- 1) Un 2% (sobre el peso de cemento) de Sikament 200 R, aditivo superplastificante añadido a la mezcla en la planta de hormigón con el fin de reducir la relación agua/cemento y de mantener el cono de trabajabilidad requerido.
- 2) Un 4% (sobre el peso de cemento) de Sigunita L-22, aditivo acelerante líquido a base de aluminio, el cual se añade a la mezcla a unos 4-5 m de la boquilla de proyección, con el fin de aumentar las resistencias iniciales y disminuir el porcentaje de rebote.

Con dicha dosificación, además de conseguirse unas resistencias a compresión iniciales de más de 3 MPa a las 2 horas, se obtienen unas resistencias medias a compresión a los 28 días de 32 MPa, medición de la resistencia a los 90 días, que la resistencia a compresión no disminuye después de los 28 días, sino que sigue aumentando.

El programa de Control de Calidad en los túneles de Parpers se realizó de una forma continua y estricta.

Cada 3 días se analizaba una artesa testigo con unas dimensiones normalizadas de 800 mm x 600 mm x 200 mm, la cual se rellenaba con el mismo hormigón proyectado utilizado en el túnel incluyendo los 20 kg de fibra de acero/m³ de hormigón.

Una vez transcurridas 24 horas, se extraían 6 testigos de dicha artesa y se introducían en una cámara de temperatura controlada en el laboratorio de ensayos de la obra.

Los 2 primeros testigos se ensayaban a los 7 días, otros dos testigos a los 28 días y los 2 últimos a los 90 días. La densidad del hormigón proyectado de dichas muestras alcanzó unos valores medios de 2,33 kg/dm³, siendo la densidad específica de la grava de machaqueo de 2,65-2,7 kg/dm³.

En los túneles de Parpers, **FCC** elaboró la mezcla de hormigón a pie de obra, y se emplearon dos equipos de proyección por vía húmeda **Aliva AL-500**.

Dichos sistemas de proyección están compuestos por una máquina de proyección **Aliva AL-262 Duplo** y un brazo robot telescópico dirigido por control remoto, todo ello instalado sobre un chasis móvil URO, el cual además lleva incorporados un depósito de aditivo acelerante líquido y el dosificador automático de aditivo líquido Aliva AL-402.

La máquina de rotor **Aliva Duplo** para la proyección del hormigón emplea aire a presión tanto en el caso de proyección por vía seca como vía húmeda.

Mediante dicha máquina de proyección la mezcla húmeda es transportada por sistema de flujo diluido, al contrario que el caso de las bombas de hormigón en donde el transporte se realiza por flujo denso.

Los dos equipos de proyección **Aliva 262 Duplo** utilizados en los túneles de Parsers tienen un rotor de dos posiciones (10-16 litros), que proporcionan un rendimiento variable de proyección de 5-7 m³/h, y 7-10 m³/h, respectivamente.

El consumo de aire en cada una de las posiciones es de 8-10 m³/min. y 11-14 m³/min respectivamente, para una distancia de transporte de 600m. en el caso de vía seca y de 45 m en el caso de la vía húmeda, empleando una presión de aire de 4-6 bares, y tuberías de baja presión de 50 mm y 60 mm de diámetro respectivamente.

Los brazos robot telescópicos AL-305.5 tienen unas dimensiones de 2m + 2 m, y un alcance en vertical de 9 m de altura y 14 m en horizontal. El aparato dosificador AL-402 inyecta el aditivo en la manguera de transporte del hormigón aproximadamente 4m antes de la boquilla de proyección.

Ciclos

En las zonas del túnel en las que el terreno es de granito de buena calidad, FCC consiguió ciclos de 6 voladuras/día, mediante tres turnos de trabajo de 8h/día.

Esto equivale a más de 6 m de avance al día en cada una de las 4 bocas, o lo que es lo mismo, un total de 25 m de avance del túnel en 24 horas. Una vez transcurrida media hora después de cada voladura, los relevos pasaban 3,5 horas retirando los escombros producidos durante la explosión.

Después de ello, se invertía media hora en la ventilación del túnel y otra media en el saneo del soporte. Posteriormente se procedía a aplicar de 3-4 cm de hormigón proyectado de sostenimiento con fibra de acero, tardándose en dicha operación aproximadamente 1 hora en proyectar 5 m³ de hormigón sobre 4,2 m de avance, o lo que es lo mismo, 2 horas en proyectar 9 m³ sobre dos avances.

Los 40-60 m³ de hormigón proyectado utilizados cada día en los cuatro frentes de excavación se elaboraban en una planta de hormigón central situada a pie de obra, y se transportaba en camiones hormigonera mediante cubas de 5 m³ de hormigón.

Más tarde, siguiendo con el ciclo de trabajo, se procedía a marcar la posición de los bulones y los taladros de perforación para las cargas de voladura empleándose para ello alrededor de 1 hora. Posteriormente, se realizaba la perforación durante las siguientes 4 horas.

Al mismo tiempo que se perforaban los taladros para las cargas de voladura, se colocaban los anclajes en la bóveda utilizando el cazo de una cargadora CAT 966 como plataforma de trabajo. Se empleó alrededor de una hora y media en colocar las cargas en el frente y en conectar los detonadores.

En el campo de la construcción de túneles en España, la obra de los Túneles de Parsers en Mataró (Barcelona), constituyen un importante avance por el concepto de la única capa de revestimiento mediante hormigón proyectado por vía húmeda, así como por los elevados rendimientos y por la alta efectividad en los costes de ejecución de dichos túneles de carretera.

Por **Shani Wallis**, periodista técnico

Hormigón proyectado por Vía Húmeda en los Túneles de El Pardo, en la autopista de circunvalación M-40 de Madrid

Las capas finas de arenas y arcillas terciarias secas que constituyen la geología bajo la ciudad de Madrid son bien conocidas por las empresas constructoras por ser poco firmes e impredecibles. Las arenas granuladas no cementadas tienen un alto contenido de finos de hasta un 60% e incluso algo superior.

Este contenido de finos se incrementa con la profundidad. Perforar túneles en este tipo de terrenos presenta unos desafíos importantes y, particularmente la excavación de túneles con grandes diámetros. Un método para la estabilización del suelo es esencial para un buen control de la excavación.

-40 de Madrid, se eligió una combinación del sistema NATM múltiple y el método Premill para controlar la excavación de los enormes túneles de carretera, cada uno de los cuales acoge una calzada de 15,4 m de ancho, con 3 carriles de tráfico de alta velocidad de 3,5 m de anchura cada uno, con arcenes de 2,5 m el derecho y 1 m el izquierdo. Cada túnel tiene una sección de excavación de 215 m² y una sección final interna de 126 m².

Los 2 túneles paralelos de 760 m de longitud, constituyen una zona crítica en la última parte del cierre de la autopista de circunvalación **M-40** alrededor de Madrid. Forma parte del diseño y construcción de un tramo de 7,1 km de dicha autopista entre las carreteras de Colmenar y la carretera de El Pardo, habiendo sido adjudicada dicha obra a la **UTE DINOR M-40** constituida por las empresas **AUXINI y OCP Construcciones**, por un total de **13.500 Mill. PTA.**



En el proyecto de los túneles de El Pardo, en la autopista de circunvalación **M-40** de Madrid, se eligió una combinación del sistema NATM múltiple y el método Premill para controlar la excavación de los enormes túneles de carretera, cada uno de los cuales acoge una calzada de 15,4 m de ancho, con 3 carriles de tráfico de alta velocidad de 3,5 m de anchura cada uno, con arcenes de 2,5 m el derecho y 1 m el izquierdo. Cada túnel tiene una sección de excavación de 215 m² y una sección final interna de 126 m².

Los 2 túneles paralelos de 760 m de longitud, constituyen una zona crítica en la última parte del cierre de la autopista de circunvalación **M-40** alrededor de Madrid. Forma parte del diseño y construcción de un tramo de 7,1 km de dicha autopista entre las carreteras de Colmenar y la carretera de El Pardo, habiendo sido adjudicada dicha obra a la **UTE DINOR M-40** constituida por las empresas **AUXINI y OCP Construcciones**, por un total de **13.500 Mill. PTA.**

El propietario del proyecto es el **MOPTMA**, a través de la Demarcación de Carreteras del Estado en la Comunidad de Madrid. La asistencia técnica al cliente fue realizada por el **CEDEX** y la unión de los **Consultings Getinsa** y **Geoconsult**. La empresa Ingeotec fue la autora del proyecto y **Gamma Geotécnica** proporcionó el asesoramiento durante la fase de construcción.

Estos túneles fueron incluidos en el proyecto con el fin de salvar el Parque del Monte de El Pardo de Madrid, que por razones ecológicas ha sido protegido de cualquier daño producido por construcciones. Era un punto de difícil solución dada la dificultosa naturaleza de la geología del terreno a excavar y la estrecha cobertura existente. De hecho, de los 760 m totales de longitud de cada túnel, 450 m, situados fuera de los límites del parque de El Pardo fueron construidos a cielo abierto.

Los restantes 310 m de túnel en cada uno de los dos sentidos pasan por debajo de dicho parque natural con una cobertura máxima de 30 m y mínima de tan sólo 12 m. La excavación de los 2 enormes túneles de 215 m² de sección bajo este límite de cobertura en un suelo tan potencialmente inestable como finalmente resultó, se dividió en distintas fases, comenzando con 2 galerías laterales inferiores, de 30-40 m², excavadas mediante el sistema NATM.

En el interior de estas galerías laterales se construye el revestimiento interior definitivo de 1,5 m de espesor que recibirá como apoyo el sostenimiento de la excavación de la parte central de la bóveda excavada mediante el sistema Premill. Los 14 m de diámetro de la bóveda superior de dichos túneles representan un auténtico record de anchura en lo que se refiere a la excavación mediante el sistema Premill en todo el mundo hasta la fecha.

Una vez que el espacio de dicha sección de la bóveda haya sido cortado por la sierra gigante de la máquina, se rellena con un hormigón proyectado de la máxima calidad en cuanto a las resistencias a conseguir, que constituye la “teja” bajo la que se excavan posteriormente los 70 m² de la sección central del túnel y las subsecuentes fases de la excavación se completan. Ésta termina con la excavación de la parte inferior del túnel, la colocación del hormigón de revestimiento definitivo y la ejecución de la capa de rodadura.

Premesa, la licenciataria en España del método Premill, construyó 2 enormes máquinas para su utilización en los túneles de El Pardo. La cuchilla de cada máquina tiene 5 m de longitud y corta una abertura de 30 cm de anchura.

Cada ciclo Premill de 14 m, comienza con el corte de una sección de aproximadamente 2 m alrededor del perfil de la bóveda, hasta alcanzar una profundidad de 4,5 m. Se retira entonces esta cuchilla y se rellena el hueco formado con hormigón proyectado.

Una vez rellena esta sección, se hace un segundo corte colindante con el primero, procediéndose de la misma forma, y así hasta completar la sección de avance. En vez de un solo corte de 19 m de desarrollo, estos cortes más pequeños son menos traumáticos para la estabilidad natural del suelo, y permiten un rellenado más rápido de cada sección.

Excavación posterior

En las arenas terciarias poco firmes de la zona, todas las secuencias de la excavación de las galerías laterales transcurren a 150 m como máximo de la excavación y cierre. El sostenimiento definitivo bajo la bóveda del Premill transcurre alrededor de 50 a 70 m por detrás después de la excavación y el gunitado de la bóveda.

Las galerías laterales progresaron con un avance de 1,5 m colocándose en cada una de ellas un sostenimiento mediante pernos y una capa de 24 cm de espesor de hormigón proyectado por vía húmeda con fibra de acero aplicada en 3 pases distintos de 6 cm cada uno. La jornada de trabajo en el interior del túnel era de 24 horas, dividido en 3 turnos de 8 h/día durante 6 días a la semana.

Para mantener la secuencia de los trabajos, las galerías laterales de los túneles seguían un avance de 1,5 m por turno/día, consiguiéndose por lo tanto un avance diario de 3 m en cada galería.

La operación Premill se llevó a cabo 30 m por detrás del revestimiento definitivo realizado en las galerías laterales. Dicho revestimiento definitivo se realizaba mediante encofrados de 10 m.

Cada sostenimiento “teja” del Premill, de 14 m de anchura por 30 cm de espesor, se coloca en un ángulo en forma de abanico para que exista un solape de 1 metro entra cada sección. A pesar de haber sido cortado en secciones pequeñas y rápidamente rellenado con hormigón proyectado, es normal y frecuente la caída de arena en dicho precorte.

Teóricamente, por lo tanto, cada sostenimiento Premill de 19 m de desarrollo por 4,5 m de profundidad por 30 cm de espesor requiere alrededor de 35-36 m² de hormigón proyectado por teja. La excavación de las galerías laterales de cada uno de los túneles, debido a su geometría, se realizó mediante una rozadora Schaeff.

Para todas las necesidades del hormigón proyectado por vía húmeda en las galerías laterales, la UTE seleccionó las máquinas de proyección Duplo de ALIVA y los aditivos del hormigón de SIKA. Se requirieron 2 máquinas de proyección ALIVA 285 con 15m³/h de capacidad.

La dosificación por m³ de hormigón proyectado por vía húmeda fue la siguiente:

- 400 kg de cemento
- 1.020 kg de arena 0-5
- 680 kg de gravín 5-12
- 184 l De agua
- 7,2 kg de aditivo superplastificante **SIKAMENT 200 R**
- 45 kg de fibra de acero

Con dicha notificación se obtenía un cono aproximado de hormigón de 15-16 cm En el momento de la proyección a 5 m de la boquilla de salida se le añade el aditivo acelerante de fraguado **SIGUNITA-L 22** en una dosificación del 4 % sobre el peso del cemento (16 kg/m³).

La excavación de los túneles comenzó en Enero de 1.994, habiéndose inaugurado en el mes de Marzo de 1.996. Hubo problemas de inestabilidad del terreno al principio de la excavación, principalmente en la zona de la sección de avance del Premill en la que se encuentra con la pared de las galerías laterales. Esto se solucionó cambiando ligeramente el perfil de la galería lateral durante la excavación del frente.

Esto ocurrió en una zona en donde el material de excavación era particularmente débil pero fue de naturaleza menor y no causó ningún daño al equipo. La deformación de las excavaciones bajo una cobertura tan poco profunda fue mayor en el eje horizontal que en el vertical.

La deformación vertical durante la excavación del avance bajo el Premill tenía una media de 5-7 mm llegando a los 15 mm en horizontal. Se llegó a un máximo de 20 mm de deformación horizontal en la excavación de las galerías laterales.

Se admitió que la técnica tiene sus limitaciones. El premill no es una técnica flexible y es solo aplicable en una determinada banda de condiciones geológicas. Bajo unas condiciones de terrenos húmedos y blandos o de roca dura presentaría problemas.

En las circunstancias de logística y geológicas tan particulares del proyecto de los túneles de El Pardo, la técnica de excavación en conjunto con las galerías NATM laterales se consiguió ampliamente.

Es la primera vez que se ha empleado una combinación de excavación entre el NATM y el Premill en una obra tan importante. Una combinación similar fue utilizada en Francia hace 15-20 años en la obra del Metro de Toulouse, pero las secciones eran mucho más pequeñas.

El revestimiento final sin armar tiene entre 40 y 60 cm de espesor y una resistencia a la compresión específica de 350 gr/cm² a los 28 días.

Todo esto, unido con la capa de sostenimiento mediante hormigón proyectado da un revestimiento definitivo total de al menos 70 cm y un espesor máximo de 125 cm, siendo un elemento muy grueso tanto para el apoyo como para el acabado.

El premill se considera únicamente como un apoyo temporal en el diseño de las especificaciones. El revestimiento final está diseñado para tener la carga prevista del túnel y dar el acabado final del mismo.

Hormigón proyectado por vía seca y húmeda Túnel de Belate (Navarra)

La mejora del puerto de Belate, itinerario común para las comunicaciones fronterizas entre Pamplona con Behobia y Dantxarinea, es un proyecto que se presentaba como absolutamente prioritario para el desarrollo socioeconómico y de las comunicaciones terrestres de Navarra.

A través del itinerario Pamplona–Behobia se conecta esta comarca con la frontera francesa, captando gran parte del tráfico de mercancías y de tránsito de vehículos, mientras que por Dantxarinea se facilita la conexión viaria entre Pamplona y la zona de Bayona y Burdeos (Francia).

La mejora del puerto de Belate, situado en la carretera N-121 va a producir una serie de efectos positivos para la Comunidad Foral de Navarra tanto desde el punto de vista del impulso económico que producirá, como desde los efectos socioeconómicos y de mejora del tráfico actual.



El túnel de Belate ha sido desde siempre una reivindicación histórica de los habitantes de las comarcas de la zona Norte de Navarra, dadas las deficiencias de la carretera existentes en la actualidad con unas características geométricas deficientes, difíciles y cerradas curvas, extremadas

pendientes y unas condiciones climáticas sobre todo, durante el invierno, especialmente adversas (nieve, hielo, nieblas, etc.), además de un tráfico de camiones y vehículos muy denso.

Las obras del Túnel de Belate finalmente comenzaron oficialmente en el mes de Julio de 1993, habiendo sido adjudicada su construcción a la **UTE BELATE**, compuesta por las empresas constructoras **AUXINI, LAIN y POTASAS DE SUBIZA**.

La longitud del túnel es de 2.950 m lo que le hace uno de los túneles de mayor longitud de los que actualmente se encuentran en excavación en España, por detrás del Túnel de Somport (9 km) y del Túnel del Negrón (4 km).

El túnel describe una curva de radio 1.500 m en una longitud de 300 m junto a la boca sur, una recta de 2.300 m y una curva a la salida de la boca norte de radio 700 m. La profundidad máxima del túnel es de 280 m. La sección del túnel es circular, de 5,90 m de radio.

La sección transversal del túnel está formada por 2 carriles de 3,50 m separados 30 cm, arcenes de 1,35 m y aceras de 0,65 m bajo las cuales van situados los colectores de agua de la filtración.

El gálibo mínimo es de 4,75 m en calzada y 4,50 m en el arcén. La sección del túnel terminado es de 71,85 m². Dentro del túnel la pendiente máxima es del 2%, descendiendo hacia la Boca Norte.

La cota máxima se encuentra a 706 m a la entrada del túnel por su Boca Sur, siendo 180 m inferior a la del puerto de Belate por la que discurre la carretera actual. Desde el punto de vista geológico, los materiales atravesados por el túnel son en un 55% de areniscas y conglomerados, y en un 45% de pizarras.

El procedimiento utilizado en la excavación del túnel ha sido mediante el Nuevo Sistema Austriaco (NATM), a base de voladuras y sostenimiento mediante bulones, cerchas y hormigón proyectado.

En cuanto a los tipos de secciones previstas en el proyecto, éstas eran mayoritariamente de sección Tipo II (1.280,5 m) y Tipo I (859,5 m) con un sostenimiento a base de bulones y hormigón proyectado, siendo las secciones Tipo III y Tipo IV previstas bastante menores (454,6 m, y 232,4 m, respectivamente) con sostenimiento mediante bulones, hormigón proyectado y cerchas situadas cada metro de distancia.

En la realidad, al acometer la excavación del túnel y una vez realizado el cale de la sección de avance del mismo en el mes de Noviembre de 1.995, se encontró una menor longitud de excavación de secciones tipos I y II (775 m y 834 m respectivamente), lo cual ha afectado lógicamente en gran medida a la finalización de la obra.

En un principio, dada la situación bastante alejada de la obra con respecto a las plantas de hormigón más cercanas, las cuales se encontraban a más de 25 km de distancia del túnel en la ciudad de Pamplona (tiempo de transporte de aproximadamente 1 hora en ambas bocas), se escogió el sistema de proyección del hormigón por vía seca, utilizando el aditivo acelerante de fraguado en forma de polvo **SIGUNITA R-2** en una dosificación del 4% sobre el peso del cemento y utilizando una máquina de proyección **ALIVA AL-285** con brazo robot telescópico de proyección incorporado.

La dosificación del hormigón proyectado por vía seca fue la siguiente:

- 400 kg. de cemento tipo II C-45 A
- 66% de arena 0-5 mm
- 32% de gravín 5-12 mm

Dadas las malas características que presentaban los áridos, en especial la arena de tamaño granulométrico 0-5 mm como componente de la mezcla de hormigón, suministrada por la única cantera existente en la zona de Pamplona, con unos porcentajes de finos extremadamente elevados con valores que superaban en algunos casos el 23% de finos, además de un equivalente de arena fuera de toda normativa, existieron algunos problemas de bajas resistencias a compresión, alcanzando ligeramente los 250 kg/cm² a los 28 días exigidos en algunas ocasiones.

Conocido es por las personas que han trabajado con el hormigón proyectado por vía seca, las dificultades que entraña su utilización con áridos con altos porcentajes de finos, afectando en gran medida tanto a la adherencia de la gunita sobre el soporte, como al rebote de proyección y a las resistencias a compresión de la misma.

Con el fin de mejorar la calidad del hormigón proyectado, se realizaron una serie de pruebas por el procedimiento de la vía húmeda, en un principio aprovechando la presencia de la máquina ALIVA AL-285 válida tanto para la proyección por vía seca como por vía húmeda.

Después de numerosas correcciones de las dosificaciones del hormigón, dada la mala calidad de la arena con la que se contaba para la elaboración de dicho hormigón, se llegó a conseguir adaptar la vía húmeda por el sistema de flujo diluido (transporte de la mezcla mediante aire a presión) mediante máquina **ALIVA AL-285** en la boca norte del túnel de Belate que presentaba unos áridos de una calidad mejor que en la boca sur, mejorándose en gran medida las características de resistencia a compresión de la gunita y la reducción de su rebote.

Posteriormente, se realizaron pruebas en la boca sur del túnel de Belate con una máquina de proyección por vía húmeda por el sistema de flujo denso (transporte de la mezcla mediante bombeo) con una máquina **ALIVA AL-277**, obteniéndose unos resultados que mejoraban ampliamente las características de la gunita por vía seca, y aumentando en gran medida el rendimiento de proyección hasta los 12 m³/h.

La dosificación final empleada en el hormigón proyectado por vía húmeda en el túnel de Belate fue la siguiente:

- 400 kg de cemento tipo II C-45 A
- 950 kg de arena 0-5 mm
- 680 kg de gravín 5-12 mm
- 196 l de agua
- 1,8 % de aditivo superplastificante **SIKAMENT 200 R**
- 4% de aditivo acelerante de fraguado **SIGUNITA L-22 R**

El tiempo de transporte del hormigón que era de una hora, y el alto rendimiento que se consigue con las máquinas de proyección por vía húmeda hace que no sea necesario la utilización de aditivos estabilizadores de fraguado, ya que con el aditivo superplastificante de efecto prolongado **SIKAMENT 200 R** empleado se obtienen unos tiempos de manejabilidad del hormigón de unas 2-2,5 horas tiempo más que suficiente en dicha obra para efectuar la proyección del hormigón desde el momento de su elaboración.

Mediante la introducción del procedimiento de la vía húmeda en el túnel de Belate se logró aumentar las resistencias a compresión exigidas sobradamente, consiguiéndose finalmente unos resultados de resistencias a compresión por encima de los 320 kg/cm² a los 28 días.

Por lo tanto, en el túnel de Belate se ejecutó simultáneamente el hormigón proyectado por vía húmeda mediante los dos sistemas existentes: flujo diluido y flujo denso.

Hormigón proyectado en el Túnel de Somport (Huesca)

El presente artículo pretende dar una información detallada del hormigón proyectado aplicado en la mayor obra de túnel realizada en España, el túnel de Somport, en la cual Sika se siente orgullosa de haber colaborado en la elaboración, puesta a punto y control del hormigón proyectado.

La construcción de un túnel fronterizo que comunicara la Comunidad Autónoma de Aragón con Francia a través del puerto pirenaico de Somport en la provincia de Huesca, es una vieja aspiración que finalmente se hará realidad a finales del año 2.001. Ya desde la época de los romanos se empleaba este paso pirenaico conocido entonces como “summus portus”.

En la Edad Media se hizo popular sobre todo entre los peregrinos al estar incluido como parte del Camino de Santiago. En el año 1.928 se inauguró el túnel ferroviario que conectaba la ciudad española de Canfranc con Francia.

Dicho túnel tiene una longitud de 7,8 km aproximadamente, aunque prácticamente no entró en servicio, debido principalmente a la pendiente tan elevada del 4,3% que presentaba el túnel. Ello hizo que en el año 1.970 se procediera a su cierre.

En Diciembre de 1.988, los ministros de Obras Públicas de España y Francia acuerdan el estudio de la mejora de las carreteras que conectan con el puerto de Somport, así como la viabilidad de la construcción de un túnel de carretera. En Abril de 1.991 se firma el acuerdo entre ambos países para la construcción del túnel.

La construcción de dicho paso transpirenaico enlazará en España el paso del puerto de Somport (1.632 m) situado en la carretera N-330 en los Pirineos Centrales, las 3 capitales aragonesas y la localidad valenciana de Sagunto a través de la futura autovía E-07, con el eje Burdeos-Limoges en Francia, permitiendo un tráfico fluido de transporte de mercancías entre Francia y España, y evitando de esta manera las duras condiciones climatológicas invernales que sufre el tráfico rodado a su paso por dicho puerto de montaña.

El proyecto de obras de construcción del Túnel de Somport, comprende la ejecución de un túnel de carretera bidireccional de 8.610 m de longitud, de los cuales 2.850 m transcurren en la parte francesa de la frontera y 5.760 m en la parte española.

Al reducirse la cota del paso fronterizo a una altitud de 1.200 m se eliminarán en gran medida los problemas invernales para el tráfico rodado, y se reducirá sensiblemente el tiempo de recorrido para los vehículos pesados.

La obra fue adjudicada a la Unión Temporal de Empresas **ERSOM UTE**, formada por las empresas constructoras **Entrecanales y Tavora S.A.**, **Enterprises Razel Freres**, y **Société Nouvelle Ducler**, siendo la empresa española **Necso Entrecanales Cubiertas S.A.** mayoritaria dentro de la UTE y responsable de la construcción de la parte española del túnel de Somport. El comienzo oficial de las obras de construcción del túnel de Somport fue en Enero de 1.994.

En el proyecto de obras del túnel de **Somport**, diseñado para una velocidad específica de 80 km/h, se incluye un especial cuidado en las medidas de protección del impacto medioambiental, con protección de recursos hídricos y garantía de un tratamiento ecológico en las zonas de vertidos, en las cuales se procederá a una revegetación final con especies autóctonas.

El túnel de Somport, en su lado español, comienza a la altura de la localidad de Canfranc Estación a una altitud sobre el nivel del mar de 1.183 m, ascendiendo ligeramente con una pendiente del 0,5% hasta alcanzar su cota máxima de 1.210 m para finalizar descendiendo con una pendiente del 1,65% hasta la boca francesa del túnel cerca de la localidad de Les Forges D'Abel situada a una altitud de 1.116 m.



El túnel tiene una sección útil de 78 m², siendo el ancho total del mismo de 10,50 m, comprendiendo 2 carriles de 3,5 m, una mediana de 1,0 m, 2 bandas laterales de 0,50 m y 2 aceras de 0,75 m, y teniendo una altura libre mínima de 4,55 m.

Como medidas de seguridad y de explotación, se han construido en el interior del túnel 86 nichos de seguridad e incendios, 9 refugios peatonales, 9 galerías de retorno, 5 apartaderos, 4 recintos para instalaciones eléctricas intermedias, así como 4 galerías de conexión con el túnel ferroviario situadas exclusivamente en la parte española del túnel.

Aunque el comienzo de las obras estaba previsto en el lado español para Enero de 1.994, las protestas realizadas por diferentes asociaciones ecologistas y por los vecinos de un pueblo cercano en relación al transporte y depósito del material excavado del túnel retrasaron el inicio del mismo hasta Junio de 1.994.

Los trabajos de excavación en el lado español se han llegado a realizar simultáneamente en 4 frentes distintos con el fin de poder cumplir los plazos establecidos para la finalización de la obra.

Estos 4 frentes han sido: el frente principal desde la boca española, 2 frentes intermedios (norte y sur) mediante una galería de conexión de 125 m con el túnel de ferrocarril existente a la altura del PK. 5+981, y la galería piloto realizada mediante tuneladora (TBM) desde el punto fronterizo hasta el pk 5+222.

En un principio se comenzó la excavación por la entrada de la boca Sur del túnel, situada a la altura de la localidad de Canfranc Estación, mediante voladura con explosivos, permitiendo el terreno un avance a sección completa en la mayor parte del tramo, con un sostenimiento con hormigón proyectado por vía húmeda y bulones anclados con resina.

En dicho frente se ha llegado a excavar una longitud de 2.192 m casi todo a sección completa, obteniéndose unos rendimientos medios de 6,13 m/día, con unos máximos de 12,22 m/día. El cale de este frente con el frente intermedio Sur se produjo el 23 de Febrero de 1.996.

En dicho frente intermedio Sur, comenzado a través de un entronque realizado desde una galería de 125 m procedente del antiguo túnel de ferrocarril, se excavaron un total de 445 m hasta producirse el cale con el frente de la boca española, pudiéndose obtener un rendimiento medio de 4,64 m/día.

Desde dicho entronque se comenzó al mismo tiempo el frente intermedio Norte, dirigido hacia la frontera para encontrarse con la galería piloto efectuada por la tuneladora, excavándose un total de 759 m, con unos rendimientos medios de 6,06 m/día.

En ambos frentes intermedios el avance se realizó a sección completa con un sostenimiento del túnel basado en hormigón proyectado por vía húmeda y bulones anclados con resina, simultaneándose la excavación en ambos frentes.

Finalmente, desde el punto fronterizo y hacia la boca española se empleó una tuneladora Wirth TBM con un diámetro de 4,70 m con el fin de ejecutar una galería piloto que permitiera un reconocimiento previo del terreno, el drenaje de las aguas y una mejora de las condiciones de ventilación en el túnel.

La tuneladora se introdujo en el frente fronterizo a través del túnel de ferrocarril existente, teniendo que excavar desde el mismo una galería de conexión de 642 m hasta alcanzar la traza del túnel nuevo, y realizando un total de 2.253 m de la galería piloto del túnel carretero. Mediante la tuneladora se obtuvieron unos rendimientos medios de 19,20 m/día con valores máximos de 39,45 m/día y 690 m/mes.

El sostenimiento de la galería piloto ejecutada mediante tuneladora se realizó en aquellas zonas en las que se necesitaba mediante bulones de fibra de vidrio, mallazo y hormigón proyectado por vía seca empleándose por primera vez en España la tecnología de los aditivos acelerantes de fraguado libres de álcali. También se emplearon placas metálicas que cerraban la sección en forma de anillo en terrenos de bajas condiciones geológicas.

El encuentro entre el frente Sur y la galería piloto de la tuneladora se produjo en Mayo de 1996. A partir de dicho momento se continuó la ejecución mediante el ensanche con explosivos de la mencionada galería piloto, con avance a sección completa y un sostenimiento fundamentalmente basado en hormigón proyectado por vía húmeda y bulones.

La tuneladora se aprovechó a continuación para la ejecución de la galería de ventilación horizontal que con una longitud de 553 m conecta el túnel carretero con el pie del pozo de ventilación de Rioseta.

El pozo de ventilación, de 7,20 m de diámetro de excavación y 6,40 m de diámetro final y 213 m de profundidad, se ejecutó mediante el procedimiento de Raise-Boring, con un sostenimiento en su sección final mediante hormigón proyectado por vía húmeda; dicho pozo de ventilación de Rioseta permitirá la aspiración de aire fresco para poder impulsarlo al punto más alto del túnel.

Por diversas razones que iremos comentando, se puede decir que en el túnel de Somport se ha aplicado el hormigón proyectado de mayor calidad que se ha ejecutado en España en una obra subterránea.

Además, es importante mencionar que al haberse encontrado durante la excavación con un buen terreno en el cual prácticamente no ha sido necesario colocar cerchas para el sostenimiento salvo en las zonas de fallas y contactos, la función de sostenimiento principal que ejerce el hormigón proyectado ha hecho que se busque una gran calidad en el mismo.

La planta de fabricación instalada en la obra del túnel de **Somport** por **ERSOM UTE** es una Elba 2.000, dotada de todas las instalaciones necesarias para hacer frente a las duras condiciones climatológicas existentes en la obra durante los meses de invierno, en los cuales se llegan a alcanzar temperaturas de -10°C con frecuentes nevadas.

Para ello, la planta tiene sistemas de calentamiento tanto del agua de amasado como de los diferentes áridos empleados. Los áridos empleados en la mezcla de hormigón comenzaron siendo de canteras próximas a la obra, utilizándose incluso áridos de río, aunque en su mayor parte se han empleado áridos procedentes de una planta montada en las cercanías de la obra, en la cual se han obtenido tanto áridos de una cantera caliza como el aprovechamiento de los materiales adecuados procedentes de la excavación del propio túnel.

El cemento empleado para los hormigones proyectados ha sido del tipo I 52.5R, el cual es el apropiado y el más indicado para este tipo de trabajos. Como conglomerante también se empleó cenizas volantes con el fin de sustituir la cantidad de cemento añadida por m^3 de hormigón.

Dada la instalación tan cercana de la planta de hormigón, la cual estaba en la boca española del túnel y se encontraba en funcionamiento las 24 horas del día, y de acuerdo con el planning de la propia obra, no se hizo necesario la adición de un aditivo estabilizador de fraguado al hormigón proyectado por vía húmeda, optándose por la utilización de un aditivo superplastificante de efecto prolongado **Sikament 200 R**, el cual proporciona un tiempo de manejabilidad de 2-3 horas desde el momento de su elaboración, tiempo más que suficiente para proceder a su proyección, abaratando además, el coste de la mezcla de hormigón.

El transporte de la mezcla de hormigón desde la planta de fabricación hasta el frente de excavación se realizó mediante camiones hormigonera propios, siendo el tiempo de transporte de unos 10-20 minutos.

Finalmente, el hormigón se vierte en la máquina de proyección, realizándose el transporte mediante bombeo hasta la boquilla de salida en la cual se le añade aire a presión por un lado (con el fin de aumentar la velocidad de salida de la mezcla), y por otro lado el aditivo acelerante de fraguado correspondiente (**Sigunita L-22 R ó Sigunita L-65**), aplicándose el hormigón mediante un brazo robot de proyección.

Los diferentes sistemas de proyección empleados en el hormigón proyectado en el túnel de Somport en los distintos frentes de excavación, han sido los siguientes:



Hormigón proyectado por vía húmeda y flujo denso, con aditivo acelerante de fraguado a base de aluminato (**Sigunita L-22 R**) en los frentes excavados mediante voladura (frente boca española, frente intermedio Sur, frente intermedio Norte, ensanche de la galería piloto, galería de conexión desde el túnel de ferrocarril), excavados por **ERSOM UTE**.

Hormigón proyectado por vía húmeda y flujo denso, con aditivo acelerante de fraguado a base de silicato (**Sigunita L-65**) en el pozo de ventilación de Rioseta, excavado por la empresa subcontratista Edilmac.

Hormigón proyectado por vía seca, con aditivo acelerante de fraguado libre de álcali (**Sigunita 49 AF**) en la galería piloto y diferentes galerías de conexión con el túnel de ferrocarril, excavado mediante tuneladora TBM y realizado por la empresa subcontratista Murer GmbH.

El sistema de proyección empleado para el sostenimiento en los frentes de la boca española (2.192 m), en el frente intermedio Sur (445 m), en el frente intermedio Norte (759 m), galería de conexión con el túnel de ferrocarril (125 m) y ensanche de la galería piloto excavada mediante tuneladora (2.895 m) ha sido mediante hormigón proyectado por Vía Húmeda y flujo denso con adición de fibras metálicas, realizándose el transporte de la mezcla mediante bombeo.

El sostenimiento contemplaba la aplicación de 2 capas de hormigón proyectado con fibras que tuviera un espesor medio de 10 cm entre las dos capas.

Recordemos que según la Norma UNE 83.607, el hormigón proyectado por vía húmeda se define como “el procedimiento mediante el cual todos los componentes del hormigón, incluyendo el agua, son mezclados previamente antes de ser incorporados a la manguera de transporte, a través de la cual serán transportados, mediante bombeo ó aire comprimido, hasta la boquilla”.

En el caso del hormigón proyectado por vía húmeda y flujo denso, el transporte de la mezcla desde la tolva de la máquina (bomba) se realiza mediante bombeo hasta llegar a la boquilla de proyección en donde se le añade el aire comprimido y el aditivo acelerante de fraguado.

En el mes de Noviembre de 1.994 se iniciaron las primeras pruebas en el frente de la boca española, con el fin de la puesta a punto del hormigón proyectado por vía húmeda y flujo denso, realizándose un estudio profundo del comportamiento de dicho hormigón proyectado, y estableciéndose diferentes fórmulas de trabajo y relaciones de áridos para cumplir con los requisitos de resistencias a compresión establecidos en el Pliego de Condiciones.

Se realizaron diferentes mediciones y controles de las resistencias a tempranas edades mediante el empleo de penetrómetro y del sistema de penetración-extracción de clavos (sistema Hilti).

Para ello, se siguieron las directrices establecidas en las Normas UNE 83.603 y 83.609, con el fin de asegurar la obtención de unas determinadas resistencias iniciales a 30 minutos y 1 hora adecuadas para favorecer el ciclo de trabajo.

Dadas las características de la obra, en la cual el tiempo de transporte máximo del hormigón podía ser en el peor de los casos de unos 20 minutos, se optó por desechar el empleo de aditivos estabilizadores de fraguado, y utilizar un aditivo superplastificante de efecto prolongado **Sikament 200R**, con una dosificación del 1,4% sobre el peso del cemento.

Con dicho aditivo superplastificante se conseguía por un lado una reducción del agua de amasado hasta conseguir una relación agua/cemento de 0,48, y por otro lado se aseguraba un tiempo de manejabilidad del hormigón de unas 2,5-3 horas desde el momento de su fabricación en la planta de hormigón

Este aditivo superplastificante se añadía directamente en la planta de hormigón junto con el agua de amasado mediante el empleo de un dosificador instalado directamente al ordenador de la planta. Igualmente, dadas las condiciones climatológicas existentes, el tipo de cemento, los condicionantes económicos, y los resultados medidos tanto de resistencias a compresión como de mediciones y ensayos de rebote, se optó por la elección de un aditivo acelerante de fraguado a base de aluminato **Sigunita L-22 R**, en una dosificación aproximada del 4 % sobre el peso del cemento, es decir unos 16 kg/m³ de hormigón.

El aditivo acelerante de fraguado **Sigunita L-22 R** se añadía al hormigón en el robot de proyección inmediatamente antes de la boquilla de proyección, controlándose su dosificación mediante un dosificador peristáltico instalado en el mismo robot de proyección. La dosificación final por m³ de hormigón empleada fue la siguiente:

- 400 kg de cemento I 52.5R
- 1.325 kg de arena de tamaño granulométrico 0-5 mm
- 375 kg de gravín de tamaño granulométrico 5-12 mm.
- 192 l de agua
- 1,4 % de aditivo superplastificante **Sikament 200 R**
- 40,0 kg de fibras metálicas Dramix

Como veremos posteriormente, mediante dicha dosificación se cumplieron sobradamente las exigencias de resistencias a compresión existentes. Los rendimientos de proyección conseguidos fueron alrededor de los 14 m³/h, con unos porcentajes de rebote mínimos del 6-8 %.

El volumen de hormigón proyectado aplicado mediante este método de la vía húmeda por flujo denso con aditivo acelerante a base de aluminato (**Sigunita L-22 R**) ha sido aproximadamente de 42.000 m³.

En Julio de 1.996 se comenzaron los primeros trabajos de ejecución del pozo de ventilación de Rioseta, habiéndose subcontratado dicha obra a la empresa italiana Edilmac.

El pozo, con una profundidad de 213 m y un diámetro de excavación de 7,20 m, se ejecutó mediante el procedimiento de Raise-Boring, realizándose en primer lugar un taladro piloto de 35 cm de diámetro y aumentándose posteriormente el diámetro de excavación progresivamente hasta alcanzar el diámetro definitivo.

El sostenimiento se diseñó mediante un hormigón proyectado de 10 cm. de espesor, ejecutándose mediante el procedimiento de hormigón proyectado por vía húmeda y flujo denso.

Dadas las condiciones de trabajo existentes, en un lugar de poca ventilación y con una aplicación manual del hormigón proyectado, se optó por el empleo de un aditivo acelerante de fraguado a base de silicato (**Sigunita L-65**), con el cual se reducían los riesgos de quemaduras de los operarios.

Como dosificación del hormigón proyectado se empleó la misma que la expuesta con anterioridad, con un aditivo superplastificante de efecto prolongado **Sikament 200 R** añadido en la planta de hormigón, y con un aditivo acelerante de fraguado a base de silicato **Sigunita L-65** añadido directamente en la boquilla de proyección en una dosificación aproximada del 6-7 % sobre el peso del cemento.

El volumen de hormigón proyectado aplicado mediante este método de la vía húmeda por flujo denso con aditivo acelerante a base de silicato (**Sigunita L-65**), utilizado para la excavación del pozo de ventilación de Rioseta ha sido aproximadamente de unos 1.500 m³.

El empleo de los acelerantes de fraguado a base de silicato se ve enormemente limitado en el caso de trabajos a bajas temperaturas, y en la zona de Rioseta, donde se excavó el pozo de ventilación, se midieron las temperaturas más bajas durante el transcurso de los trabajos (-14°C)

Por otro lado, la utilización de este tipo de acelerantes de fraguado conlleva una drástica reducción de las resistencias a compresión a 28 días.

Sin embargo, se pudieron finalizar de una forma óptima los trabajos, cumpliendo sobradamente las resistencias mecánicas a compresión exigidas.

Como se mencionó con anterioridad, en Septiembre de 1.995 se iniciaron los trabajos de excavación de la galería piloto mediante una tuneladora **Wirth TBM de 4,70 m** de diámetro, habiéndose subcontratado la realización de dicha obra a la empresa suiza Murer GmbH.

Con la tuneladora se excavaron un total de 2.895 m (642 m correspondientes a la galería de acceso desde el túnel de ferrocarril y 2.253 m de la galería piloto del túnel carretero), además de los 762 m de la galería horizontal de ventilación que conecta la caverna de instalaciones del túnel con el pie del pozo de ventilación.



Aunque el terreno presentaba unas buenas características de dureza y resistencia, en ciertas zonas fue necesario realizar un sostenimiento del frente de excavación mediante la aplicación de un hormigón proyectado por vía seca, además de la aplicación de morteros preparados en seco de elevada resistencia.

En la obra del túnel de **Somport** en dicha galería piloto excavada mediante tuneladora se ha utilizado por primera vez en España y con un éxito comprobado, la última tecnología de aditivos acelerantes de fraguado, el acelerante libre de álcali **Sigunita 49 AF**.

Este tipo de aditivo acelerante presenta una serie de mejoras importantes en relación a los aditivos acelerantes de fraguado tradicionales empleados hasta ahora.

Entre otros estaría que son productos no cáusticos (por lo tanto no queman) contribuyendo así a la salud, seguridad e higiene en el trabajo, y su utilización conlleva que no exista una reducción de las

resistencias a compresión a 28 días a la vez que se cumplen todos los requisitos exigidos en cuanto a las resistencias iniciales del hormigón proyectado, a diferencia de los acelerantes tradicionales.

La dosificación del aditivo acelerante de fraguado **Sigunita 49 AF** empleada fue aproximadamente del 4 % sobre el peso del cemento, añadiéndose a la mezcla seca de hormigón antes de introducirla en la tolva de alimentación de la gunitadora.

La dosificación final por m³ de hormigón proyectado por vía seca empleada fue la siguiente:

- 400 kg de cemento I 55 A
- 1.445 kg de arena de tamaño granulométrico
- 255 kg de gravín de tamaño granulométrico

El volumen de hormigón proyectado aplicado mediante este método de la vía seca con aditivo acelerante libre de álcali (**Sigunita 49 AF**), utilizado para el sostenimiento en la excavación mediante tuneladora ha sido aproximadamente de unos 600 m³.

En determinadas zonas en las cuales se exigía unas sollicitaciones más elevadas al sostenimiento, se empleó un mortero preparado en seco, **Sikacem Gunita 133**, a base de cemento, resinas sintéticas y humo de sílice, especialmente diseñado para su proyección por vía seca, y que aseguraba la obtención de unas resistencias mecánicas a 28 días próximas a los 500 kg/cm².

Diversos factores que influyen en la proyección y elaboración del hormigón, así como un completo y exhaustivo seguimiento de dicho hormigón, realizado por un Laboratorio de obra propio, han hecho posible que en la obra del túnel de **Somport** se hayan obtenido unas resistencias a compresión y unos porcentajes de rebote que convierten a esta obra en la de mayor calidad de la gunita en España:

- ▲ Seguimiento exhaustivo de cada camión de hormigón que se proyectaba por parte del laboratorio de obra, con medición de conos de salida de planta, cono de proyección, etc.
- ▲ Planta de hormigón propia con todos los medios para resistir las adversas condiciones medioambientales durante el invierno (bajas temperaturas, heladas, nieve, etc.)
- ▲ Buena calidad de los áridos (arena y gravín) componentes de la mezcla de hormigón, con realización de ensayos granulométricos diarios de los mismos
- ▲ Utilización de un cemento tipo Portland I 55 A, especialmente indicado y recomendado para trabajos de hormigón proyectado
- ▲ Medios humanos y materiales (tipo de máquina por vía húmeda y flujo denso)

Todo ello ha posibilitado que se hayan obtenido los siguientes resultados:

1. Unos porcentajes de rebote de proyección mínimos del 6 %
2. Unos valores de las resistencias a compresión elevados, muy por encima de los exigidos en el pliego de especificaciones del hormigón proyectado de la obra
3. Prácticamente nula formación de polvo durante la proyección
4. Elevados rendimientos de proyección, próximos a los 14 m³/h

En lo referente a las resistencias a compresión, a continuación se realiza una exposición de los resultados medios conseguidos en las resistencias medidas a 3, 7, 28 y 90 días, de un muestreo aleatorio que comprende 7 meses de trabajo, con un total de 636 testigos ensayados:

Hormigón Projectado por Vía Húmeda

- Resistencia a 3 días 223,7 kg/cm²
- Resistencia a 7 días 268,6 kg/cm²
- Resistencia a 28 días 323,7 kg/cm²
- Resistencia a 90 días 370,2 kg/cm²

Por otro lado, las resistencias a compresión medias obtenidas durante la aplicación del hormigón proyectado por vía seca con utilización de aditivo acelerante de fraguado libre de álcali Sigunita 49 AF en el tramo ejecutado mediante tuneladora (TBM) fueron las siguientes:

Hormigón Projectado por Vía Seca

- Resistencia a 3 días 204,8 kg/cm²
- Resistencia a 7 días 260,4 kg/cm²
- Resistencia a 28 días 323,6 kg/cm²
- Resistencia a 90 días 350,2 kg/cm²

Como se puede comprobar los resultados son óptimos, obteniéndose la resistencia a compresión exigida a 28 días (250 kg/cm²) en un plazo de aproximadamente 4 días. Además de ello, es importante verificar que la resistencia a compresión aumenta con el tiempo, pasados los primeros 28 días, habiendo aumentado la resistencia entre los 28 y los 90 días en un 15 %.

En el Túnel de **Somport** se está ratificando que si existe un exhaustivo control del hormigón proyectado en todas sus fases (elaboración, transporte, proyección) y una mentalización de los operarios que intervienen en el proceso, acompañado por unos medios materiales de calidad (cemento, áridos, aditivos), el hormigón proyectado por Vía Húmeda es el hormigón proyectado del futuro inmediato.

Sika, como empresa suministradora de los aditivos implicados en el hormigón proyectado aplicado en el túnel de Somport, se ha involucrado en todo momento a lo largo de todo el periodo de ejecución de la obra a través de su equipo técnico, dando una asistencia técnica personalizada a la empresa constructora **ERSOM UTE** con el fin de obtener un hormigón proyectado final de alta calidad que garantizara en todo momento la seguridad del túnel.

Sika, como empresa especialista en túneles, se siente orgullosa de haber podido colaborar con su tecnología de aditivos en la ejecución de la obra más significativa e importante realizada en España en el campo de las obras subterráneas, el **túnel de Somport**.

Hormigón proyectado por Vía Seca en el Túnel de Veriña – Monte Areo (Asturias) con aditivo acelerante libre de álcali (Sigunita 49 AF)

La dirección de la empresa ENSIDESA previó la construcción de un nuevo trazado ferroviario con el fin de conectar la factoría de Veriña con otras instalaciones de la empresa para realizar el transporte del material producido.

Dentro de dicho proyecto, se encuentra incluida la construcción de un túnel de unos 1.761 m de longitud que cruza por debajo del Monte Areo y desemboca en la localidad de Poago (SE) partiendo desde el comienzo de un nuevo viaducto que se está construyendo para salvar el río Pervera. El nuevo túnel está proyectado con vía única y un gálibo suficiente para su electrificación.

Desde el punto de vista geológico, el túnel de Monte Areo afecta en diferente proporción a dos grandes unidades litoestructurales: la península de Cabo de Peñas (que incluye sedimentos del paleozoico) y la cuenca mesozoica Gijón-Villaviciosa, las cuales están separadas entre sí por la Falla de Veriña, la cual intersectará el túnel a unos 475 m de la boca sureste.

La serie litoestratigráfica del paleozoico incluye en los muros cuarzititas de Barrios, pizarras de Formigoso, ampelitas, pizarras grafitosas, capas de areniscas, calizas, margas pizarreñas así como formación Furada con areniscas y argilitas alternantes, mientras que en la bóveda está formada por calizas con diversas proporciones de pizarras calcáreas, arcilla e intercalaciones de calcarenitas. La serie mesozoica está formada por trías Garmánico, margas y margo calizas.

De lo explicado anteriormente, se observa que existe una gran variedad de terrenos por los cuales atravesará el túnel de Monte Areo, lo cual provocará igualmente que estén previstos 4 tipos de sostenimiento distintos en cada una de las zonas por las que se excavará dicho túnel:

Sostenimiento tipo S1: Gunita armada con fibra metálica (8 cm de espesor), con bulones de 3 m en bóveda

Sostenimiento tipo S2: Gunita armada con fibra metálica (2+6+6 cm) con bulones de 3 m en la bóveda. En ciertos tipos de terreno se prevé colocar dicho sostenimiento pero con capas de sellado de 5 cm (5+6+6 cm)

Sostenimiento tipo S3: Cercha metálica, gunita armada con fibra metálica (6 cm) y 3 capas de 8 cm de gunita con mallazo

Sostenimiento tipo S4: Tipo Bernold, con un refuerzo adicional en los emboquilles

El túnel de Monte Areo (Veriña) tiene una planta recta y pendiente uniforme del 0,89% ascendente, con una longitud aproximada de 1.761 m y una sección tipo ovoide truncado con arcos laterales de radio 6,332 y arco superior de radio 2,50 m.

La sección elegida corresponde a túneles ferroviarios de vía única, con gálibo de 3,35 m de ancho y 4,30 m de altura. La vía va centrada con el túnel, disponiéndose a ambos lados del mismo, cunetas cubiertas de 0,40 m de ancho que sirven de contención del balasto.

Para facilitar el tráfico de maquinaria en el túnel durante el proceso constructivo y permitir el acopio durante la explotación, se ha ampliado la sección en varias zonas del túnel en los tramos de mejor calidad de terreno, realizándose anchurones de unos 15 m de longitud a distancias aproximadas de 250 m.



Desde el punto de vista constructivo, en las formaciones de cuarcitas y calizas se realiza la excavación mediante voladuras, mientras que en las zonas de formación tableadas, margosas o pizarrosas se recurre a la excavación mediante rozadora.

Desde un primer momento se pensó en la utilización del sistema de proyección por Vía seca con acelerante en polvo, comenzándose con el empleo de un aditivo acelerante de fraguado tradicional en forma de polvo, debido principalmente a la abundante presencia de agua en el interior del túnel, para lo cual la Vía Seca es más recomendable que la Vía Húmeda.

Además de ello, la abundante presencia de agua durante la excavación, provocaba una gran cantidad de quemaduras entre los operarios que se encontraban trabajando en el túnel. Más tarde se realizaron diferentes pruebas con el nuevo aditivo acelerante de fraguado libre de álcali Sigunita 49 AF, con una dosificación del hormigón proyectado por m³ como la siguiente:

- 400 kg de cemento tipo I 45 A
- 1190 kg de arena de tamaño granulométrico 0-5 mm
- 404 kg de gravín de tamaño granulométrico 5-12 mm

Con dicha dosificación se obtuvo una mejora importante en cuanto a la reducción de rebote de proyección, alcanzándose unas resistencias muy elevadas. Esto hizo por un lado que se redujera progresivamente la cantidad de cemento por m³ de la mezcla de hormigón, adicionándose a la vez humo de sílice para mejorar las resistencias y rebotes.

Finalmente, se ha conseguido diseñar una gunita con la siguiente dosificación por cada m³ de hormigón, capaz de cumplir sobradamente con las exigencias de resistencias a compresión que se requieren:

- 310 kg de cemento tipo I 45 A
- 1190 kg de arena de tamaño granulométrico 0-5 mm
- 404 kg de gravín de tamaño granulométrico 5-12 mm
- 20 kg de adición a base de humo de sílice
- 4% de aditivo acelerante libre de álcali Sigunita 49 AF

Con la utilización del aditivo acelerante de fraguado libre de álcali Sigunita 49 AF, se han alcanzado unos resultados espectaculares en cuanto a los siguientes factores:

- Eliminación de posibles quemaduras y riesgos para el personal que trabaja en el túnel, habiéndose reducido al mínimo las bajas del personal interviniente por dicho concepto
- Nula bajada de resistencias a compresión a 28 días, a diferencia de lo que ocurría con los aditivos acelerantes tradicionales
- Disminución del rebote de proyección
- Posibilidad de bajada de la cantidad de cemento hasta límites que no se conocían hasta el momento

Por primera vez en España, en la obra del Túnel de Veriña – Monte Areo se ha utilizado a gran escala la nueva generación de aditivos acelerantes de fraguado del futuro, formada por productos no tóxicos que no producen riesgos en la salud de los operarios, permiten el diseño de gunitas de alta resistencia sin tener que aumentar en grandes dosificaciones las cantidades de cemento del hormigón, y mejorando en gran medida la calidad del hormigón proyectado.

Hormigón Proyectado en el Proyecto de Nueva Mina – León

Por: Don. Enrique Castells Fernández

Ingeniero de Minas – Director de Obras de S.A. Hullera Vasco Leonesa

Don José Luis Rivas de la Riega

Ingeniero T. Topógrafo – Director de M. y S. de Sika S.A.

El presente artículo pretende dar una información detallada del hormigón proyectado aplicado en la mayor obra de preparación minera, en Europa “**Proyecto Nueva Mina**” de **S.A. Hullera Vasco Leonesa**, en la cual **Sika** se siente orgullosa de haber colaborado en la elaboración, puesta a punto y control del hormigón proyectado.

La **S.A. Hullera Vasco Leonesa**, empresa íntegramente privada, explota una mina de carbón desde hace más de 100 años en el norte de la provincia de León, cerca de la localidad de Santa Lucía de Gordón. Actualmente se encuentra preparando una nueva mina, vista la cercanía del agotamiento de la actual. Este proyecto, el mayor de Europa, supone una inversión total cercana a los 50.000 millones de PTA.

La 1ª parte del proyecto consistió en la ejecución de dos pozos verticales de 6,5 m de diámetro útil y 652 y 945 m de profundidad. La **S.A. Hullera Vasco Leonesa** hizo coincidir la finalización de las labores de esa 1ª fase con la instalación en los pozos de guionaje, escalas, cables, tuberías, etc., llevadas a cabo con una disminución sustancial del plazo por la **UTE PROSANTA**. La 2ª parte del proyecto consistía en la ejecución de más de 16.000 m de galerías y obras de infraestructura.

Tras un proceso de precalificación y selección entre 4 grupos internacionales se eligió la UTE formada por las empresas que realizaron la obra anterior: **DRAGADOS, OBRAS SUBTERRANEAS y DEILMANN HANIEL GMBH** que pasó a denominarse **UTE PROSANTA GALERIAS**.

Hay que comentar que las galerías se encuentran a profundidades comprendidas entre 200 m y 900 m, con secciones útiles de 9 a 25 m², excepto en los entronques donde llega a ser superior a los 50 m². En total hay realizados hasta la fecha 71 entronques (bifurcaciones de galerías con ángulos variables entre 30° y 150°), 9 pocillos verticales de sección circular, de diámetro útil variable entre 2,5 y 7 m. y entre 5 y 27 m de longitud respectivamente.

También hay un plano inclinado de 14° que al final de las obras tendrá 2.950 m de longitud y 15 m² de sección útil. Los terrenos, siguiendo la clasificación de Bieniawski (Rock Mass Ratio), están comprendidos en su mayoría en el rango 20 a 40, llegando en algunos casos a 65.

La litología de la zona incluye todos los términos intermedios existentes entre lutitas y areniscas, con intercalaciones de conglomerados y de capas de carbón.

La textura de los materiales es muy cambiante, con contactos de estratos que van de graduales a bruscos, llegando a coexistir ambos y con muy frecuente presencia de fallas. El buzamiento oscila en ambos planos del sinclinal Matallana entre 30° y 50°, y entre 80° y 85° en el sinclinal de Llombrera.

Obras de Infraestructura

Las obras a efectuar incluyen galerías, planos inclinados y pozos con una longitud total de 17 km con secciones variables entre 5 y 50 m² siendo los más frecuentes los de 10, 15, 17 y 25 m².

Las mediciones más significativas son:

- Excavación: 335.000 m³
- Hormigón proyectado: 75.000 m³
- Hormigón encofrado: 4.500 m³
- Bulones: 190.000 ud.
- Cuadros metálicos: 12.800 ud.
- Vías: 17.500 m

La excavación llevada a cabo mediante la técnica de perforación y voladura, y el sostenimiento emplean una mecanización inusual en la minería española, incluyendo como equipos más importantes jumbos, palas, locomotoras, pánceres, ventiladores y equipos de hormigón proyectado.

Jumbos electrohidráulicos de 2 brazos que se desplazan sobre orugas dotados de los mecanismos necesarios para conseguir el paralelismo de la pega y la maniobrabilidad de los brazos en secciones relativamente pequeñas para poder perforar también los taladros de los pernos de sostenimiento.

El arranque se lleva a cabo perforando barrenos marcados previamente y cargados con explosivos encartuchados que llegan al tajo introducidos en vainas o bien con explosivo tipo ANFO a granel cargado neumáticamente.

Palas electrohidráulicas sobre orugas de vuelco lateral que en general vierten sobre vagones de 3 m³. En otras ocasiones la carga a los vagones se efectúa a través de transportadores blindados o pánceres, que son máquinas de uso eminentemente minero al no ser posible el acceso de vagones por los planos inclinados, por tratarse de galerías más estrechas u otras razones.

Locomotoras que maniobran con los vagones entre los frentes de las galerías y los embarques de cada planta del pozo. En estas son cargados y elevados en jaulas hasta la superficie, en donde descargan y vuelven a la jaula para ser introducidos de nuevo en el pozo. El escombro extraído pasa a una cinta y de ahí va a una tolva, desde la cual es cargado en camiones.

Los ventiladores aspiran desde el exterior el aire viciado del frente. Están conectados por el pozo a una red de tuberías que permite poder simultanear el avance en los distintos tajos.

Sin duda lo más complejo es el sostenimiento de los huecos abiertos dadas las especiales características del terreno, muy plegado y fracturado y con frecuentes fallas, que requiere para su equilibrio de un sostenimiento flexible y progresivo que haga colaborar el terreno en su propio soporte.

Hablamos del Nuevo Método Austríaco (NMA) que es el empleado en la mayor parte de las galerías con resultados muy satisfactorios y que se basa en la colocación de hormigones proyectados y bulones.

El sostenimiento de las labores debe permitir que estas cumplan perfectamente sus funciones tanto durante su construcción como en la fase de explotación, en la que los grandes volúmenes de carbón extraído modifican el estado tensional existente y tienden a cerrar los huecos creados.

El empleo del hormigón proyectado tan masivamente, es un mito a nivel europeo en obras de estas características.

Para conseguir rendimientos aceptables en su colocación, ha sido necesario vencer muchas dificultades, sobre todo, derivadas del acceso hasta el lugar de su aplicación desde las plantas hormigón situadas en el exterior donde es mezclado.

Es imprescindible estabilizar la mezcla de hormigón proyectado pues el momento de su uso puede demorarse varias horas desde su fabricación. El revestimiento con hormigón encofrado sólo se emplea en algunas labores tales como en fosos, tolvas, etc. El hormigón se introduce en vagones remezcladores y se coloca con bombas de pistón.

Precisamente estas labores destacan por la complejidad y calidad de su ejecución que ha conllevado el empleo de varias toneladas de hierro en armaduras.

Se ha dotado a la obra de medios humanos y materiales que minimicen los riesgos inherentes a labores de estas características y que controlen la calidad necesaria para garantizar la correcta ejecución.

Los equipos de personal, más de 300 hombres y la maquinaria, con una inversión estimada de unos 1500 millones de PTA en medios muy específicos que deben cumplir las estrictas normas europeas para minas de carbón, permiten avances del orden de los 500 m mensuales.



Método de avance y sostenimiento

Las labores de fácil acceso y los planos inclinados de pendiente menor de 20° se entiban según los principios del NMA. Las labores de mayor pendiente serán entibadas con cuadros metálicos. El avance se realiza mediante perforación y voladura.

Para evitar dañar la roca remanente, se emplean explosivos específicos de recorte (cordón detonante) y tiros perimetrales muy próximos. No hay que olvidar que un buen sostenimiento comienza con una buena voladura. La longitud de la pega va en función de la calidad del terreno, y oscila entre 1 y 3,5 m/pega.

El comportamiento del terreno depende en gran medida del método de avance seleccionado. Dada la gran heterogeneidad de los estratos presentes en los frentes de avance, combinando diferentes durezas de roca (fundamentalmente pizarras y areniscas), el uso de rozadoras es desaconsejado (alto consumo de picas y bajo rendimiento).

Por ello, se recurrió al avance con perforación y voladura, que tiene como inconveniente un mayor deterioro de la roca que rodea la excavación debido a las vibraciones, onda de choque y onda de presión.

Otros parámetros que tienen gran importancia son los siguientes:

- Sección de excavación,
- Profundidad de la galería,
- Forma de la excavación,
- Tipo de roca atravesada,
- Longitud de pase (distancia entre el frente y el tramo de galería ya sostenido),
- Tiempo transcurrido hasta la colocación del sostenimiento,
- Secuencia de colocación del mismo,
- Estado tensional del macizo rocoso,
- Características mecánicas del sostenimiento,
- Sentido y dirección de avance, etc.

Un mismo terreno se comporta de distinto modo según el tratamiento que reciba. Con el Nuevo Método Austríaco lo que se pretende es controlar el terreno para conseguir lo más pronto posible el estado secundario de equilibrio, convirtiendo al terreno en elemento portante.

Las deformaciones deben ser minimizadas para que el terreno pierda lo menos posible su resistencia inicial, disminuyendo su disgregación dañina. Para ello, es de gran ayuda el efecto de la gunita y del bulonado.

El hormigón proyectado crea un conjunto “roca-hormigón” que evita la meteorización, y debido a sus propiedades plásticas amortigua las tensiones de flexión, impidiendo el esponjamiento inicial incontrolado de la roca hacia el centro de la excavación. Una vez fraguado, produce una alta resistencia.

Si el hormigón proyectado fuera poco flexible inicialmente, acumularía tensiones hasta alcanzar y sobrepasar las resistencias de cizallamiento, agrietándose la capa. El bulonado disminuye la influencia de las heterogeneidades, retardando y oponiéndose a las deformaciones.

Como consecuencia de todo lo anterior disminuyen las convergencias. La valoración geomecánica de los terrenos, y las campañas de mediciones realizadas, permiten controlar en un terreno poco estable su estabilización.

Básicamente el ciclo de avance con NMA se compone de las siguientes etapas:

1. **Perforación de la pega.** La longitud de perforación varía entre 1 y 3,5 m/pega. Para realizarla se dispone de jumbos Deilmann-Haniel de 2 brazos telescópicos.
2. **Carga de explosivo.** Usualmente se emplea dinamita para el avance de las galerías, y cordón detonante de 100 g/m en los tiros de recorte. Actualmente se están realizando con explosivos tipo ANFO, consiguiéndose resultados muy buenos y más económicos.
3. **Disparo,** ventilación, regado de la pega y saneo.
4. **Desescombro.** Para evacuar los escombros se emplean palas electrohidráulicas, que descargan el escombro sobre los vagones de 3 m³ de capacidad. Una vez cargados los 8 vagones que componen una maniobra, una locomotora los transporta hasta el embarque de la planta, donde pasan a la jaula y ya en el exterior y una vez vaciados, son introducidos de nuevo en la jaula.

5. **Sellado.** Para mantener la autoestabilidad de terreno se aplica hormigón proyectado y bu- lones de anclaje, protegiéndose así la cavidad. La capa de sellado es delgada y flexible. El comportamiento plástico que presenta ayuda a reducir y redistribuir las tensiones. A medida que progresa el fraguado, la resistencia del sostenimiento va aumentando.

La capa de sellado tiene al menos 3 cm de espesor, su resistencia máxima a las 5 horas es de 5 MPa, a las 24 horas de 10 MPa, y mínimo de 25 MPa a los 28 días. En función de la calidad del terreno se decide el momento de su colocación. En terrenos buenos se coloca después del desescombro, sellado los hastiales y la corona. Si el terreno es algo peor, se procede también al sellado del frente.

En terrenos malos, se sella en dos fases. Primero desde encima del escombro se sella la roca descubierta del frente, de los hastiales y de la corona; en una segunda fase, después de desescombrar, se procede a sellar el resto de la roca descubierta. La capa de sellado ayuda también a que la roca no se meteorice y no se degrade.

6. **1ª capa de hormigón proyectado estructural**, de 10 cm de espesor mínimo. Se coloca a una distancia comprendida entre 2 y 9 m del frente (en función del tipo de terreno y de la evolución de las medidas de control aplicadas sobre el sostenimiento).

Esta capa de hormigón proyectado lleva fibra metálica en su composición. La fibra metálica mejora la resistencia a tracción y el comportamiento dinámico.

La misión de esta capa de hormigón estructural es detener las deformaciones y establecer un equilibrio secundario. El logro de la estabilidad de una galería reside esencialmente en modificar lo menos posible el estado tensional inicial del terreno.

7. **2ª capa de hormigón proyectado estructural** de 5 cm de espesor mínimo. Esta capa se coloca en las galerías más profundas y sólo cuando estas realmente lo exigen.



8. **Pernos de sostenimiento sistemático.** Se procede a barrenar los taladros con el jumbo. Para conseguir mejores rendimientos, los jumbos Deilmann-Haniel disponen de brazos telescópicos que permiten el barrenado simultáneo de dos anillos de bulones.

Luego se inyectan los tiros en toda su longitud con una lechada de cemento con aditivo tixotrópico y se introducen los pernos. Son del tipo de acero corrugado * 25 con una resistencia mínima de 250 kN.

Los bulones consiguen reducir las influencias producidas por las heterogeneidades y eliminar en parte el efecto de esponjamiento de la roca, haciendo que las fuerzas radiales de empuje de la roca se conviertan en tensiones tangenciales.

Los parámetros básicos a determinar son la longitud y la densidad de los bulones. La longitud a emplear varía entre 2 y 4 m Mientras que la densidad oscila entre 0,8 bulones m² a 1,25 bulones /m².

En terrenos particularmente malos, o como medida adicional de protección que permita conseguir unos contornos óptimos de excavación, es necesario el empleo de paraguas y limitar la longitud de pase para garantizar un buen comportamiento de la roca que rodea la excavación.

El NMA se basa en conseguir que el terreno intervenga de forma activa, ayudando a estabilizar la excavación. El anclaje ayuda a engendrar una estructura en forma de bóveda.

Las características del terreno se ven afectadas por el método empleado para la excavación, por el estado tensional primario, por el comportamiento con el tiempo del sostenimiento y por el tramo libre de galería sin sostenimiento.

REQUISITOS DE LOS MATERIALES

- Vida útil de la mezcla

Se pretende conseguir que el material tenga una vida útil antes de la proyección superior a 5 h desde el momento de la fabricación en planta, a fin de posponer del tiempo necesario para su transporte y en prevención de posibles incidencias que puedan retrasar su puesta en obra.

Para conseguir esto, se ha optado por el aditivo SIKACRETE PPX, el cual es un producto específico para hormigones proyectados en cuya composición lleva una parte de microsílíce y la proporción de retardante necesaria.

- Áridos

Los áridos empleados para la obtención del hormigón proyectado son los siguientes:

Arena silíce lavada de 0 a 6 mm procedente de la gravera de Recursos Naturales del Suelo, situada en Tapia de la Rivera.

Árido calizo de machaqueo de 6 a 12 mm procedente de la cantera de Magil situada en las proximidades de La Robla.

Se realizan los siguientes ensayos periódicos en el Laboratorio de Obra:

Determinación del equivalente de arena

Determinación del contenido de materia orgánica

Análisis granulométrico

Determinación de humedades

- Cemento

El cemento elegido posee una adición de cenizas volantes que al mezclarse con el clinker del cemento Portland proporciona al conglomerante un efecto puzolánico, que se traduce en una mayor lentitud en el desarrollo de las resistencias y una mayor compacidad de los hormigones.

- Agua

El agua procede de la zona y cumple con las especificaciones de la Instrucción EH-91

- Adición de humo de sílice

Con el fin de conseguir un hormigón proyectado más cohesivo, y con una mayor densidad, utilizamos en la fórmula de trabajo un 4% de Condensil, adición de humo de sílice densificado, que aparte de las propiedades antes citadas, que posee la ventaja de reducir el rechazo, de aumentar la resistencia a los sulfatos y potenciar las resistencias mecánicas.

- Acelerante de fraguado

Como acelerante de endurecimiento y fraguado se ha elegido un acelerante líquido, la SIGUNITA LN, que se ha probado en distintas proporciones, hasta llegar a la que más se adapta a la curva de endurecimiento que se considera óptima. Este porcentaje es del 4%.

- Máquina de Vía Semihúmeda

Las máquinas utilizadas para la proyección del hormigón proyectado por vía semihúmeda han sido ALIVA 262 y brazos de proyección sobre oruga modelo AL 503, equipadas ambas con motor neumático.

FORMULA DE TRABAJO

Después de las pruebas iniciales y de los ensayos previos y característicos, la fórmula de trabajo ha quedado determinada de la siguiente manera:

- Arena (0-6mm): 1.280 kg
- Gravilla (6-12 mm): 540 kg
- Cemento CEM II B-V 32,5 R 360 kg
- Estabilizador (Sikacrete PPX) 7,2 kg
- Humo de sílice (Condensil) 14, 4 kg
- Acelerante (Sigunita LN) 14,4 kg

El agua se añade en punta para una relación agua/cemento de 0,4

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGON PROYECTADO

Según el proyecto, el hormigón proyectado debe ser tal que mantenga una cierta flexibilidad al inicio para adaptarse a los movimientos del terreno.

Debe cumplir que la resistencia a compresión a 5 h sea menor o igual a 5 MPa, y menor o igual a 10 MPa a las 24 h. Se considera como ideal un endurecimiento a edades tempranas según las curvas anejas. La resistencia a 28 días será superior a 25 MPa.

Dimensionamiento de las capas de hormigón proyectado para el sostenimiento de galerías y planos inclinados

En el proyecto de ejecución, se consideran las siguientes capas de hormigón proyectado, según el tipo de galería, terreno, recubrimiento, etc.:

- Capa de sellado de 3 cm de espesor sin fibras de acero
- 1ª capa de 10 cm de espesor y 50 kg/m³ de fibras de acero
- Ocasionalmente se coloca otra 2ª capa de 5 cm de espesor con fibras.

Rendimientos obtenidos

Podemos considerar los siguientes rendimientos medios:

- Capa de sellado de 3 cm: 4,0 m³/ h
- Capa de 10 cm con fibras: 4,5 m³/ h

Mediciones de rechazo y compactación

Se realizan en obra mediciones periódicas de rechazo y compactación. Podemos considerar los siguientes resultados medios:

- Rechazo: - En hastiales: 24%
 - En clave: 35%

La medición se realiza recogiendo sobre una lona, previamente extendida en el suelo de la zona donde se va a proyectar, los restos del hormigón proyectado y pesándolos a continuación. En función de la cantidad proyectada, se determina el porcentaje de rechazo.

Compactación: Resultado medio de 25%

Se proyecta sobre una artesa y se determina la compactación por relación entre el volumen de hormigón proyectado y el obtenido en la artesa.

Métodos de ensayo

Con el fin de comprobar el proceso de endurecimiento y fraguado del hormigón proyectado se realizan una serie de ensayos que comienzan a la media hora y finalizan a los 28 días.

La metodología utilizada, en función de las distintas edades del hormigón se basa en tres métodos principales:

- Determinación de la resistencia a compresión in situ por medio de penetrómetro (UNE-83-603-94).
Este método se utiliza para edades comprendidas entre media hora y cinco horas.
- Determinación de la resistencia a compresión in situ. Ensayo de penetración/extracción (UNE 83-609-94)
Este método se emplea para edades de 24 horas empleándose un equipo TESTER HILTI homologado para dicho ensayo.
- Determinación de resistencia a 7 y 28 días: Se proyecta sobre una artesa normalizada y se extraen varios testigos de 68 mm de diámetro, que una vez tallados y refrentados se rompen a compresión en una prensa hidráulica. Se realiza la corrección correspondiente por esbeltez.

PRUEBAS CON ACELERANTE LÍQUIDO LIBRE DE ALCALI

Por razones de seguridad en el trabajo, se consideró la posibilidad de emplear un acelerante líquido libre de álcalis para evitar las quemaduras ocasionales que se producen al contacto con la SIGUNITA LN debido a su elevado PH.

Se realizaron pruebas con el producto SIGUNITA L 50 AF y se descartó su empleo debido a que la curva de endurecimiento obtenida se ajustaba peor a la establecida.

Seguimiento y mediciones

Otro de los pilares básicos del avance siguiendo los principios del Nuevo Método Austríaco es el de las mediciones y control de la estabilización del estado tensional.

Por un lado se realiza un levantamiento geológico de los estratos, clasificando y puntuando geomecánicamente el frente después de cada disparo, siguiendo los postulados de la clasificación de Bienawski pero adaptado a las condiciones particulares de roca presentes en la obra.

La diferencia básica estriba en introducir criterios que permiten valorar el efecto negativo de la deformación tectónica, muy intensa en esta zona. Se introdujeron modificaciones conceptuales o cualitativas (orientación de juntas y abertura de las mismas) y cualitativas (peso de cada uno de los parámetros).

Con ayuda de tablas de valoración y según los tipos de terrenos atravesados (en nuestro caso estratificados o conglomerados), se procede después de cada voladura a la clasificación del índice de calidad del terreno.

Con estos valores se ha realizado un análisis que permite identificar intervalos de calidad geotécnica, cada uno de los cuales se ajusta mejor a un sistema específico de avance y a un tipo determinado de sostenimiento necesario.

De este modo se han clasificado los terrenos en intervalos de calidad, y en función de la profundidad y de la sección de la excavación se ha tabulado la longitud de avance permisible y el sostenimiento mínimo necesario en cada caso, así como medidas de refuerzo necesarias.



Por otro lado, y sistemáticamente, se coloca instrumentación específica para comprobar como se comporta y evoluciona el sostenimiento. Por ello se colocan estaciones de convergencia cada 20 m de avance, o en zonas singulares que así lo requieran.

Las deformaciones del contorno de la galería medidas en función del tiempo indican el momento en el cual será necesario colocar otros elementos adicionales de sostenimiento.

También se realizan medidas de tensiones radiales, tangenciales y carga sobre bulonaje, así como de extensión del radio de plasticidad mediante extensómetros.

Es importante colocar la instrumentación inmediatamente después de terminar de colocar el sellado, efectuando a continuación la primera medición. La evaluación de las medidas tomadas ayuda a la adopción de medidas de sostenimiento suplementarias.

Control de calidad

Es necesario realizar permanentemente medidas de control de calidad para impedir fallos de construcción y ejecución, evitándose así con posterioridad reparaciones costosas o complicadas. Además de comprobar la calidad de los materiales recibidos en obra, es necesario efectuar una serie de ensayos sobre los materiales colocados.

Así, por ejemplo, se controla mediante probetas "in situ" la evolución de la resistencia del hormigón proyectado, se realizan pruebas de endurecimiento, controles de resistencia inicial del hormigón, control de espesores, ensayos de tracción sobre bulones, controles topográficos de dirección y pendiente, nivelaciones,..

Otras singularidades de esta obra

Como otras singularidades realizadas en esta obra cabe citar:

Empleo de bulones de acero corrugado inyectado con lechada de cemento tixotrópico en toda su longitud, evitándose el empleo de los tradicionales cartuchos de resina y de cemento, y consiguiéndose mayores rendimientos y mejor calidad que con otros métodos.

Empleo de pernos largos de cable destrenzado en forma de jaula de pájaro para refuerzo y reparación. Estos pernos, con longitudes de 5 a 12 m y 50 t de resistencia, son empleados con inyección previa de lechada de cemento tixotrópico en toda su longitud.

Empleo de cementos ultrafinos en inyecciones para reparación de galerías y recuperación del anillo portante. Estos productos, con un grado de finura tan grande como el empleado, no son fabricados en España.

Nuevas Tecnologías Acelerante Libre de Álcali. Sigunita L 50 RF Hormigón Proyectado Vía Húmeda Túnel de Belate (Navarra)

OBRAS SUBTERRÁNEAS S.A. ha llevado a cabo la Reparación y Refuerzo del Túnel de Belate en Agosto de 1999, en un tiempo récord de 18 días. El **Hormigón Proyectado** utilizado se ha ejecutado con la utilización de acelerantes libres de álcali, sistema que ofrece una primicia en lo que se refiere a la Seguridad e Higiene en el trabajo de túneles.



El revestimiento realizado con Hormigón Proyectado, requería una resistencia a la compresión $R_c > 35$ MPa, además de necesitar una manejabilidad suficiente para poderlo transportar desde una planta de hormigón en Almandoz.

Se emplearon dos tipos de Hormigón Proyectado: HPS-35 y HPF-35 con humo de sílice y fibras respectivamente, ambos estaban dosificados con el acelerante libre de álcali **Sigunita L 50 RF** al 6% de dosificación del cemento empleado (420 y 400 kg respectivamente).

Las cantidades de **Hormigón Proyectado libre de álcali** proyectadas han sido superiores a 2.300 m³, en un plazo ininterrumpido de 15 días, obteniéndose los resultados esperados tanto en el plazo convenido, como en las características técnicas diseñadas.

Los trabajos de **Hormigón Proyectado** se realizaron de acuerdo con la Norma **UNE 83.607** y han sido supervisados y controlados por **GEOCONTROL**, los resultados obtenidos se expresan en las tablas 1 y 2 adjuntas.

Los suministros de productos Sika para el Hormigón Proyectado: Superplastificante **Sikament TN 100**, Humo de sílice líquida **Sikacrete L** y acelerante de fraguado libre de álcali **Sigunita L 50 RF**, por su cuantía y el corto plazo de ejecución (> 300 t), fueron objeto de un programa especial de intervención, para poder alcanzar los objetivos logísticos previstos.

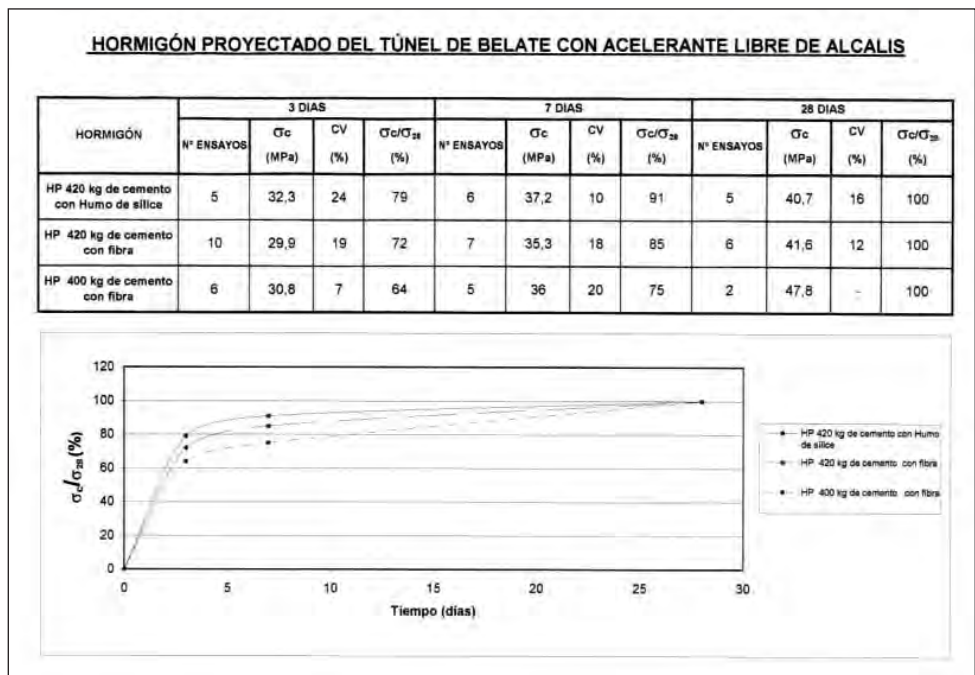


Tabla 1.- Representación gráfica de Resultados

ROTURAS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN PROYECTADO DEL TÚNEL DE BELATE

Fecha de proyección	P.K.	Tipo de hormigón	Dosificación de cemento	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)		
				3 días	7 días	28 días
09/08/99	4+895	HPS-35	420 kg/m ³	-	-	-
10/08/99	4+990	HPS-35	420 kg/m ³	-	-	-
13/08/99	5+590	HPS-35	420 kg/m ³	417	412	418
				394	390	450
14/08/99	5+720	HPS-35	420 kg/m ³	264	320	395
				-	340	-
14/08/99	5+725	HPS-35	420 kg/m ³	239	359	465
				302	410	427
15/08/99	5+840	HPS-35	420 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
Resistencia media del HPS-35 (420 kg/m³ cemento)				323	372	407
Coefficiente de variación				24%	10%	16%
17/08/99	5+670	HPS-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
Resistencia media del HPS-35 (400 kg/m³ cemento)				-	-	-
Coefficiente de variación				-	-	-
11/08/99	5+500	HPF-35	420 kg/m ³	290	-	-
				295	-	-
14/08/99	5+690	HPF-35	420 kg/m ³	254	395	405
				191	-	-
14/08/99	5+785	HPF-35	420 kg/m ³	384	446	498
				367	358	398
14/08/99	5+825	HPF-35	420 kg/m ³	331	390	460
				249	292	409
15/08/99	5+910	HPF-35	420 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
16/08/99	5+950	HPF-35	420 kg/m ³	314	353	396
				314	344	-
16/08/99	6+125	HPF-35	420 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
Resistencia media del HPF-35 (420 kg/m³ cemento)				299	353	416
Coefficiente de variación				19%	18%	12%
17/08/99	5+960	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
17/08/99	6+120	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
18/08/99	6+090	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
18/08/99	6+105	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
18/08/99	6+195	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
19/08/99	5+965	HPF-35	400 kg/m ³	311	-	-
				295	398	-
19/08/99	6+375	HPF-35	400 kg/m ³	326	288	-
				338	430	-
20/08/99	6+090	HPF-35	400 kg/m ³	-	-	-
				-	-	-
20/08/99	6+250	HPF-35	400 kg/m ³	284	408	478
				292	379	477
Resistencia media del HPF-35 (400 kg/m³ cemento)				308	360	478
Coefficiente de variación				7%	20%	0%
Resistencias medias				307	361	421

Tabla 2.- Resultados del Hormigón Proyectado libre de álcali

Sika fabrica, controla y suministra a aditivos para Hormigón Proyectado a Empresas Constructoras en todo el mundo > **48.000 Ton / anuales**. En España Sika S.A. fabrica y suministra sus productos después de haber pasado rigurosos controles a los que obliga su sistema de gestión de calidad según la Norma Internacional **UNE EN ISO 9001-94**, certificada por **AENOR**, con fecha 20/7/93 y da servicio técnico adecuado y recogido así mismo en el anterior sistema de gestión.

Sika se siente orgullosa de la calidad de sus Clientes y en especial de **OBRAS SUBTERRÁNEAS, S.A.** como realizador de esta significativa obra, colaborando en la optimización y adaptación de dosificaciones, control y puesta a punto del Hormigón Proyectado.

Hormigón proyectado por vía húmeda – Túneles Rabo de la Sartén

La Unión Temporal de Empresas **NACIONAL III UTE**, formada por las empresas OCP, ACS y Firmecivil iniciaron en el mes de Abril de 1.998 la ejecución de las obras de excavación de los túneles de la Presa de Contreras, 2 túneles gemelos de carretera de 280 m de longitud cada uno, pertenecientes a la Autovía N-III, a su paso por el pantano de Contreras, en el límite de las provincias de Cuenca y Valencia.



La geología del terreno por la que transcurre el túnel recomienda el empleo de un sostenimiento mediante bulones y hormigón proyectado con fibras de acero, sustituido en algunos casos por otros tipos de sostenimiento.

Dados los volúmenes previstos inicialmente de hormigón proyectado, así como los espesores a aplicar durante la excavación se escogió la utilización del sistema de hormigón proyectado por vía húmeda, flujo denso, con el cual se están consiguiendo excelentes resultados en cuanto a los rendimientos de trabajo y a los rebotes de proyección obtenidos (alrededor del 8-10%), empleándose para ello un aditivo superfluidificante **Sikament TF-100** y un aditivo acelerante de fraguado **Sigunita L-22 R**.

El producto **Sikament TF-100** es un aditivo superfluidificante de efecto prolongado, con el cual se consigue aumentar tanto las resistencias iniciales (por su combinación con el acelerante de fraguado) como las resistencias finales a 28 días por su efecto de reductor de agua, además de permitir un tiempo de manejabilidad del hormigón de 2-3 horas.

El producto **Sigunita L-22 R** es un aditivo acelerante de fraguado especialmente indicado para trabajos de hormigón proyectado por vía húmeda, con el cual se consigue aumentar las resistencias iniciales y disminuir el rebote de proyección, y que ha sido ampliamente probado y utilizado en las mayores obras de túnel ejecutadas en los últimos años en España (Somport, Belate, El Pardo, Mataró, AVE Madrid-Barcelona).

Sika se siente orgullosa de contribuir con su cualificada asistencia técnica y con la calidad de sus productos a la ejecución de esta obra, colaborando en el diseño y en la puesta a punto del hormigón proyectado, así como en el seguimiento de la calidad del mismo.

Equipos de Hormigón proyectado Sika/PM – Autovía del Mediterráneo

En el sur de España se está construyendo un nuevo tramo de la Autovía del Mediterráneo. Tres equipos de hormigón proyectado modelo SIKAPM

500 P se encargan del avance y sostenimiento de los tres túneles de doble tubo (total 5,04 km de túnel) mediante el procedimiento de hormigón proyectado por vía húmeda en sistema convencional de excavación (NATM), repartidos en el tramo de 9 km.

El tramo en obras entre La Herradura y Taramay (zona de Almuñécar) es parte del trazado de la “Autovía del Mediterráneo”, Carretera N-340 que conecta la ciudades de Cádiz y Gibraltar, situadas en el sur de la península Ibérica, con Barcelona, situada en el noreste.



La construcción del tramo corresponde a **UTE. LA HERRADURA**, una agrupación constituida por las empresas constructoras **PLODER S.A., AZVI S.A. y OBRAS SUBTERRÁNEAS S.A.**

El tramo totaliza 9,12 km de longitud, de los cuales 1.820 m discurren como calzadas unidas y 7.300 m como calzadas separadas, con 3 túneles dobles de longitud total de 2.520 m y 4 viaductos con una longitud total de 2.170 m.

La complejidad del trazado llevó al solicitante, el Ministerio de Fomento, a presupuestar inicialmente un precio de construcción total de 180 millones de €; con un coste de 20 millones de € por kilómetro, convirtiéndose en uno de los tramos de autovía con los costes de construcción más altos de Europa.

Actualmente se calculan unos costes de aproximadamente 157 millones de €. Los trabajos se iniciaron en marzo de 2003 y se terminarán previsiblemente en septiembre de 2006.

Mientras los viaductos se componen de dos estructuras portantes paralelas con longitudes de 350 m, 2 x 580 m, y 630 m, respectivamente, los túneles se ejecutan como obras individuales para cada sentido de circulación.

Los seis tubos (2 x 2.170 m, 2 x 278 m y 2 x 220 m) totalizan una sección de excavación de aproximadamente 110 m² y se avanza a razón de 6 a 10 m por día, en función de si es o no necesario la instalación de cerchas de los tipos THN 21 y THN 29.

Los tres equipos móviles de hormigón proyectado por vía húmeda SIKA-PM500 P están funcionando desde septiembre 2003 en los diferentes tramos en obra.

Inicialmente encargados de sostener las laderas de los emboquillados y actualmente en el sostenimiento eficaz de la excavación de los túneles según el Nuevo Método Austriaco, que se realizan en avance y destroza. La tracción y dirección a las cuatro ruedas permite utilizar las máquinas con seguridad en terreno accidentado.

El amplio campo de trabajo de las máquinas SIKA-PM500 las hace adecuadas para la proyección de hormigón por vía húmeda en taludes altos, en cavernas y túneles con medidas entre 4,5 m y 17,5 m.

La bomba de doble émbolo Putzmeister, instalada en dirección longitudinal en la parte trasera del vehículo, tiene 1.000 mm de carrera y cilindros de transporte de 180 mm de diámetro, igual que la bomba estacionaria BSA 1005.

Con un rendimiento máximo de 30 m³/h y solo 19 carreras por minuto, es una bomba base idónea para la proyección por vía húmeda de hormigón de baja pulsación. El dispositivo automático horizontal del brazo de proyección ha demostrado ser sumamente útil para los trabajos de hormigón proyectado, en los seis tubos de los túneles de LA HERRADURA.



Este dispositivo fija automáticamente en posición horizontal el chasis telescópico de 3 m. En combinación con el cabezal pulverizador de boquillas maniobrable se consigue una capa proyectada sumamente uniforme con un rebote mínimo.

Todas las SIKA-PM500 utilizadas en LA HERRADURA llevan de serie un dosificador de líquidos (Sika Aliva-403.5) y uno/dos depósitos para aditivos (a razón de 1.000 l de capacidad).

Los equipos de proyección se suministraron sin equipos de compresor, dada la existencia de conducciones de aire a presión en los túneles.

En total se proyectarán 75.000 m³ de hormigón en los seis túneles. El bombeo del hormigón para la terminación de los túneles, aproximadamente 80.000 m³ del tipo H 40/50, 180.000 m³ de hormigón de alta resistencia

(H 60/75) y 100.000 m³ de resistencia H 25/30, corresponderá a bombas de hormigón estacionarias utilizadas previamente en la construcción de las pilas y tableros de los viaductos. Todas las máquinas de bombeo de hormigón son Putzmeister.

UTE Eix-Berguedá – Desdoblamiento Eje Pirenaico C-16 (Barcelona)

Esta referencia corresponde a los túneles realizados por la **UTE Eix-Berguedá (FCC, COMSA, COPISA² Y COPCISA)**, en la obra Desdoblamiento Eje Pirenaico C-16 (Barcelona) que forma parte de del itinerario Barcelona-Tolosa de Languedoc-Orleans, integrado en la red de carreteras de interés comunitario según el acuerdo de Ginebra de 1.985.



El tramo en ejecución incluye dos túneles paralelos 2 x 950 m de longitud y sección transversal de 110 m², con hormigón proyectado de 30 MPa de resistencia característica.

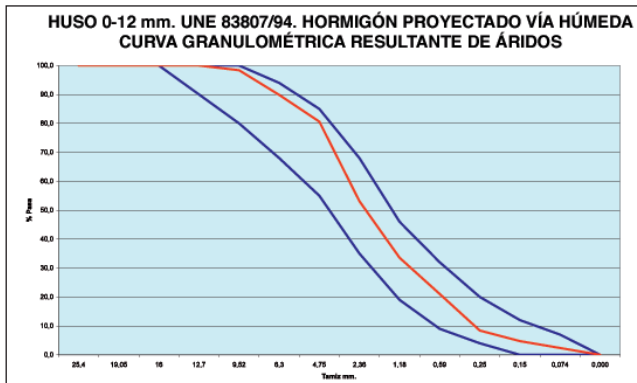
Para ello, los responsables de la UTE optaron por montar una planta propia de obra, capaz de fabricar y suministrar los diferentes hormigones contemplados en el Proyecto.

Después de una serie de pruebas, analizando los áridos de la zona (Velvor), y el cemento disponible (CEM I 52,5 R), se propuso la siguiente dosificación:

- Cemento (CEM I 52,5 R) 425 kg
- Arena 0/5 1053 kg 61%
- Arena 0/2 259 kg 15%
- Grava 5-10 414 kg 24%
- Sikatell 200 4,25 kg
- Sika ViscoCrete SC 305 4,29 kg
- Relación A/C 0,42
- **Sigunita L 53 AFS (4%)**, y sólo en algún caso, Sigunita L 22 R (4%)

²Referencia realizada con la colaboración de D. Ignacio Calvo (COPISA)

En la gráfica que se muestra a continuación, se representa la curva resultante de la mezcla propuesta, junto con los límites del huso 0-12 mm, de la Norma UNE 83.607/94 Hormigón Proyectado Vía Húmeda.



A lo largo de toda la fase de excavación de los túneles se ha utilizado acelerante libre de álcali **Sigunita L 53 AFS**, empleando acelerante aluminato únicamente en algunas zonas con cerchas. Por otro lado, en referencia a la maquinaria empleada en la obra, la UTE dispone de un robot Sika PM 500 de última generación.

Galería D'Envalira (Andorra)

Constructora: UTE Galería D'Envalira (OSSA³; T.P. La Coma)

La Galería D'Envalira puede considerarse como una obra singular, ya que combina diferentes factores adversos que dificultan su ejecución además de las condiciones climatológicas del emplazamiento de la obra (2200 m. de altura y temperaturas de hasta -17°C).

Se trata de una galería de pequeña sección, aproximadamente de 17 m², con una longitud de 2.932 metros, además de las 11 galerías de conexión al túnel principal en actual explotación con un tránsito permanente.

La funcionalidad de dicha galería es la de dotar al túnel de salidas de emergencia acordes con la nueva legislación, además de permitir el paso de diversas instalaciones a Francia (telefonía, electricidad, agua...).

Una de las curiosidades de esta obra son los métodos de excavación utilizados, ya que se han combinado diferentes sistemas como son la perforación y voladura, utilización de medios mecánicos como ITC o retroexcavadora, métodos mixtos o el empleo actual de un minador AM-50 en la boca de Pas de la Casa. Es evidente pues, la complejidad y heterogeneidad del macizo, que condiciona la elección del método más adecuado en cada momento.

³Referencia realizada con la colaboración de D. Emilio Freire (Obras Subterráneas, S.A.)



Uno de los factores más importantes para el buen desarrollo de la obra es contar con un grupo de suministradores de nuestra confianza, que garanticen el producto y apoyo técnico adecuados para estas duras condiciones y que garanticen los suministros en plazos acordes a las necesidades de la obra, a pesar de los trámites aduaneros del país.



Soluciones Sika:

La ubicación de la obra y de la planta de hormigón, a más de 2.100 metros de altitud, junto con las severas condiciones climatológicas del pasado invierno han sido una buena prueba para equipos y productos.

En estas condiciones, se hace indispensable el uso de sistemas de calentamiento del agua de amasado, hasta lograr una temperatura adecuada en la mezcla.

Para el hormigón de la solera de la Galería y los hormigones de exterior se emplea el aditivo superplastificante **Sikament 500** de base vinilo, ayudado de un aditivo anticongelante Friolite para poder trabajar en esas condiciones tan adversas.

Por su parte, para el hormigón proyectado de la Galería se utiliza un aditivo superplastificante de base policarboxilato de alta reducción de agua **ViscoCrete 5920**, junto con **Sikatell 200** diseñado

para mejorar mecánicamente el hormigón final, aumentar la adherencia reduciendo el rechazo, y rebajar la permeabilidad del hormigón. De esta forma se consigue una mezcla de hormigón proyectado altamente durable.

Se está trabajando desde las dos bocas de la galería y se ha montado instalación de acelerante de fraguado en ambas. El acelerante empleado es la **Sigunita L 22 R** de base aluminato y se han realizado pruebas con **Sigunita L 53 AFS** libre de álcali.

La obra dispone de equipos **Sika PM 407** para la colocación del hormigón proyectado dada la reducida sección de las labores.

TÚNELES DE SARRIÁ y MONTAGUT. Línea de Alta Velocidad Madrid – Zaragoza – Barcelona – Frontera Francesa

Tramo: Sarriá del Ter-Sant Julia de Ramis (Girona)

Empresa propietaria: ADIF (Mº FOMENTO)

Empresa adjudicataria: UTE ESTACIÓN AVE SARRIA DEL TER (ALDESA – COALVI)

Empresa constructora: PROACON S.A.⁴

Descripción de los trabajos:

A lo largo del trazado, que tiene una longitud total de 4.965 m, se localizan dos túneles de doble vía:

Túnel	Tipo de Terreno	Longitud Total (m)	Sección (m²)
Sarriá	Marga Compacta	3.042	105
Montagut	Marga Compacta	475	142

- **Túnel de Sarriá:** Discurre entre el pozo de extracción (PK 303+688) hasta su salida en el término municipal de Sarriá del Ter, junto a un antiguo peaje de la autopista AP-7 (PK 306+730), que se prolonga con un túnel artificial de 57,35 m.
- **Túnel de Montagut:** Se trata de un túnel que discurre entre los PK 307+260 y el 307+735, con 475 m de longitud, a los que se añaden 75,80 y 156,70 metros de los túneles artificiales en los extremos. Este túnel, excepto los primeros metros del túnel artificial, se sitúa en el término municipal de Sant Juliá de Ramis.

Dada la naturaleza elástica de los materiales rocoso que atravesarán los túneles, se ha considerado que el sistema de construcción mas adecuado es el de avance y destroza mediante la utilización de métodos convencionales, complementando con la colocación de un sostenimiento activo formado, básicamente, por bulones, cerchas, mallazo y hormigón proyectado.

En el proyecto de construcción de los túneles de Sarriá y Montagut está prevista la ejecución de 3 pozos los cuales se utilizarán como salida de emergencia y ventilación

⁴ Referencia realizada con la colaboración de D. Johnatan González (Proacon, S.A.)

Tabla 1: Características de los pozos

Pozo	P.K.	Profundidad (m)	Dimensiones
1	303+640	39	32,3 x 23,5m
3	305+185	23	13 m
4	305+720	20,41	12,68 m



Soluciones Sika:

En un tramo de estas características una de las principales partidas es el hormigón proyectado. Se ha optado por emplear un aditivo superplastificante de tercera generación Sika ViscoCrete 5940 de base policarboxilato, capaz de garantizar la manejabilidad del hormigón durante el tiempo necesario para su puesta en obra y con una elevada reducción de agua de amasado para mejorar las resistencias mecánicas del hormigón.

La zona donde se ubica el tramo soporta fuertes variaciones de temperatura entre los meses de verano y de invierno. Por este motivo, se ha propuesto en su día la incorporación de sistemas para calentar el agua de amasado y permitir una reacción adecuada del hormigón proyectado sobre el soporte.

Finalmente, se ha elegido la Sigunita L22R como acelerante de fraguado para el hormigón. Posicionado como aditivo acelerante de alta gama, este producto de base aluminato permite trabajar en condiciones desfavorables con un bajo rango de dosificaciones.

La obra dispone de robots Sika-PM 500 de última generación para la colocación del hormigón proyectado.

4 HORMIGÓN DE REVESTIMIENTO DE TÚNELES

4.1 Introducción

El revestimiento definitivo de un túnel consiste en una estructura de hormigón que reviste la cavidad y que está en contacto directo con el terreno o con el sostenimiento previamente ejecutado.

El revestimiento estructural de hormigón de un túnel representa una garantía para evitar la caída de elementos del sostenimiento, como aflojes de los bulones o elementos de gunita.

Las funciones fundamentales del revestimiento son:

a) Impermeabilización b) Función resistente c) Funcionalidad d) Estética

La práctica habitual en túneles pasa actualmente por una excavación a sección completa, o en avance (media sección) y destroza, en toda su longitud, con un sostenimiento más o menos denso según las características del terreno.



Foto 9.- Hormigón de revestimiento de túnel terminado

Según sea el comportamiento tensodeformacional del sostenimiento y del terreno, se diseñará un revestimiento que dependerá de los siguientes puntos.

- 1) En el caso de que el equilibrio no se modifique (materiales con **RMR > 50**), lo que sucede en rocas de buena calidad, por ejemplo clases I y II de Bieniaswki, el revestimiento no tendría misión estructural y su función será de tipo estético y/o funcional.
Algunas Administraciones acostumbran, en estos casos a prescindir del revestimiento, quedando la sección únicamente con el sostenimiento, recurriéndose algunas veces a paneles prefabricados para mejorar la estética del conjunto.
- 2) A medio y largo plazo, en rocas con **RMR < 50**, la disminución de los parámetros resistentes del material, por la acción del agua y/o por agentes físico-químicos, puede originar el desarrollo de un incremento de empujes, que deberá ser resistido por el revestimiento.
- 3) Si el revestimiento es impermeable, y la sección completa, se restablecerá la presión hidrostática alrededor del túnel. Esto ocurre en materiales fisurados y es bastante discutido en terrenos rocosos sanos o en materiales impermeables.
- 4) En el caso de túneles excavados en terrenos expansivos que, al descomprimirse y existir aporte de agua, desarrollan su potencial expansivo. Se trata de una hipótesis que conviene tener muy en cuenta, ya que puede tardar mucho tiempo en revelarse.
- 5) Que se realice una nueva excavación en el entorno del túnel, con lo que se modificarán las tensiones y, por consiguiente, el equilibrio, con desarrollo de nuevos empujes.

Revestimientos con hormigón bombeado

La forma y la geometría de un revestimiento vienen marcados por consideraciones geotécnicas y suelen relacionarse entre la excavación y los medios utilizados, así como el uso al que esté destinado el túnel.

En cuanto a las fases de excavación, aunque también están ligados a la forma del túnel, dependen, en gran medida, de las dimensiones de la sección y del plazo de ejecución.

Geometría

La geometría que puede adoptar el revestimiento de un túnel puede ser complicada, combinando diferentes curvas circulares. Normalmente, suelen ser similares a la forma de la excavación. Como norma general y tomando como criterio de elección las características geotécnicas del terreno:

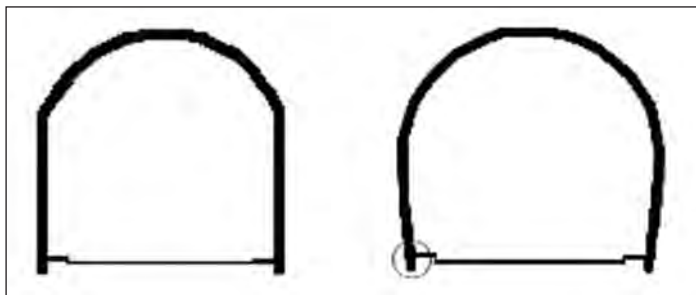


Figura 17.- Detalle de secciones tipo

1. En terrenos de características geotécnicas estables a largo plazo, el revestimiento suele adoptar la forma de arco de medio punto con hastiales rectos y los espesores > 30 cm.

2. En terrenos de tipo medio, los revestimientos son en forma de herradura. Siempre es necesario el correspondiente cálculo de la sección y comprobarse las tensiones en los apoyos.
3. En terrenos de mala calidad, donde existirán empujes a medio y largo plazo, es necesario disponer formas cerradas, con contrabóveda, que serán planas o curvas, en función de los empujes previsibles.

Cuanto peor sea el terreno, o si se esperan presiones debidas a la expansión, se debe tender a la forma circular.

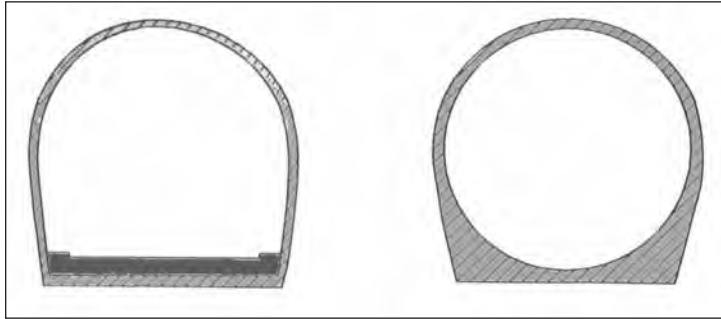


Figura 18.- Detalle de secciones con contrabóveda

4. Cabe exceptuar, en el último caso de geometría circular, la que se da a túneles hidráulicos, por motivos meramente funcionales, sin que tengan influencia la forma de la excavación ni consideraciones geotécnicas.

Fases de ejecución y puesta en obra

Pueden darse los casos siguientes:

- a. En terrenos de buena calidad, hormigonado a plena sección, una vez terminada la excavación del túnel. La excavación ha podido realizarse, asimismo, a plena sección o por motivos de mayor facilidad en la colocación del sostenimiento, por fases (avance y destroza), siendo esta modalidad la habitual en túneles de carreteras o ferrocarril, debido a su tamaño.
- b. En terrenos de peor calidad, hormigonado de la media sección superior, una vez excavada ésta en toda su longitud y, posteriormente, hormigonado de hastiales por bataches y, eventualmente, de la contrabóveda. Como ya se ha dicho en (a), este sistema puede también ser utilizado por motivos de tamaño de la sección.
- c. La mala calidad del terreno puede obligar a ir hormigonando el avance cerca del frente excavado, así como, con el debido decalaje, los hastiales y la contrabóveda.
- d. Simultanear el hormigonado del avance, destroza y contrabóveda (caso de existir) con la excavación puede ser necesario e independiente de las características del terreno, por el plazo de ejecución.

En este caso, si el túnel se excava con explosivos, hay que estudiar la separación entre el frente y la destroza de forma que puedan controlarse los efectos de las voladuras.

La colocación del hormigón se realiza tal y como se muestra en la figura que se muestra a continuación con las diferentes fases.

La masa fresca de hormigón rellena el hueco entre el encofrado (casi siempre metálico) y el terreno, adaptándose a las irregularidades de la roca y adoptando la forma externa del encofrado. En roca sana se independizan en el tiempo las fases de excavación y revestimiento si no hay ningún condicionante de plazo.

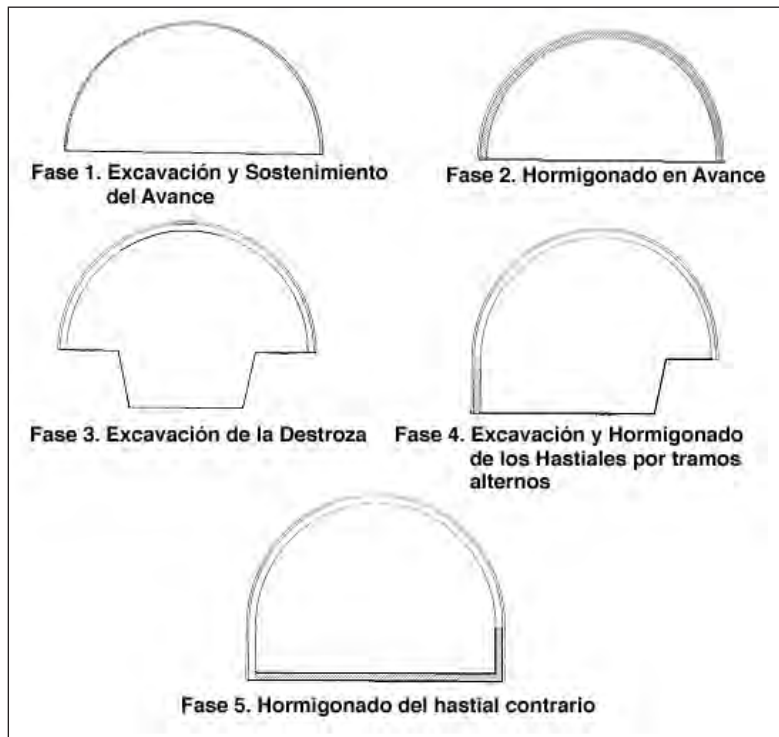


Figura 19.- Fases del hormigonado en avance y destroza

Si el plazo lo impone, pueden simultanearse excavación y revestimiento, adaptando las medidas necesarias para pasar el desescombro a través del encofrado y abastecer de hormigón al tajo.

Esta simultaneidad es posible en secciones amplias. En secciones pequeñas se complica por razones de espacio y las interferencias repercuten en todas las actividades.

Si el revestimiento y la excavación se realizan simultáneamente, el revestimiento ha de avanzar intermitentemente, al mismo ritmo que lo hace el frente de excavación. Cuando el tiempo de fraguado lo pide o la distancia al frente de excavación está limitada, el encofrado debe ser telescópico.

El hormigonado se hace alternativamente por ambos hastiales de forma que la altura sea del mismo orden y finalmente se cierra en clave. Cuando la excavación y el revestimiento son independientes, bien por tratarse de terreno sano o haberse sostenido previamente, el revestimiento puede ser continuo; en este caso, el encofrado tiene que ser telescópico.

El número de módulos de encofrado, de longitud 6 m. viene impuesto por el rendimiento deseado, así como por los tiempos de desencofrado y duración de la actividad desencofrado-encofrado en cada módulo.

Cada módulo parcial de encofrado se mueve independientemente, mediante carro portaencofrados automotriz y mecanizado que desencofra, traslada y encofra, enlazándose los módulos entre sí de forma que proporcionan un encofrado continuo sin más cierre frontal que las paradas de fin de semana o cuando se desee.

También el hormigón se coloca alternativamente por cada hastial, avanzando por tongadas inclinadas sin cierre de clave. Los encofrados deben llevar ventanas, convenientemente distribuidas, que permitan la colocación y vibrado del hormigón.

Como medios de colocación se emplea generalmente la bomba de hormigón. El límite superior de rendimiento puede estimarse en órdenes de 50 m/día. Como dato puede decirse que es posible alcanzar rendimientos del orden de 1000 m/mes.

Inyecciones de contacto

Como operación complementaria del revestimiento, se debe realizar inyecciones de contacto, con lechada o mortero a baja presión, con objeto de rellenar los huecos existentes en la roca y hormigón próximo a la zona de contacto para sellar dicha superficie.

En el revestimiento de hormigón colocado in situ, la inyección puede extenderse a todo el contorno, pero debe cuidarse fundamentalmente la bóveda, que es donde cabe esperar una mayor proporción de huecos, producidos por dificultades durante el hormigonado ya que es la zona más difícil de rellenar.

Los taladros de inyección se colocan al tresbolillo con una densidad aproximada de uno cada 6 m², y profundidades en roca de 0,60 a 0,80 m con objeto de consolidar la misma en el entorno próximo a la zona de contacto; el diámetro de perforación recomendado es de unos 50 mm.

La presión de inyección suele ser inferior a los 0,2 MPa. La mezcla está formada por lechada más o menos densa, se emplean normalmente dosificaciones al 50%. En caso de que existan grandes huecos, puede utilizarse mortero de cemento y arena en la relación 1:1.

Armaduras

Generalmente los revestimientos de túneles son de hormigón en masa, siendo escasos los casos en los que se precisan armaduras. Como excepción se pueden citar los siguientes:

- ▲ Túneles en terrenos expansivos
- ▲ Túneles en zonas de fallas
- ▲ Zonas parciales de túneles con transmisión de esfuerzos: Unión de zapatas y contrabóveda o unión de revestimiento con muros

En estos casos suele ser suficiente con redondos de 25-32 cm de diámetro pasantes de 0,50 m en cada lado. En líneas generales las armaduras se deducirán del cálculo y serán capaces de absorber los esfuerzos esperados.

Revestimiento con hormigón bombeado en encofrado perdido

Es interesante citar siquiera de forma breve, este tipo de revestimiento, que puede utilizarse como sostenimiento o como revestimiento definitivo (en este caso, con una aplicación de hormigón proyectado sobre la chapa).

La ejecución de este método va estrechamente ligada a las placas de encofrado metálico de las cuales el tipo Bernold es el más popular, de forma que la mayoría de las veces se habla sencillamente de Método Bernold.

Se trata de unas chapas perforadas, corrugadas y curvada de 1080 mm x 1200 mm y espesor de 2 ó 3 mm que ejercen a la vez de encofrado y armadura. Se montan sobre cimbras de montaje especiales solapándose unas con otras y entrelazadas con pernos.

Contando con los solapes, cada chapa cubre una superficie útil de 1 m². Van provistas de distanciadores que tienen por misión arriostrar longitudinalmente el conjunto.

Se utiliza un hormigón con relación agua/cemento de 0,4 a 0,5 y consistencia plástica dura. El tamaño máximo del árido suele ser de 30 mm (15 mm en el caso de hormigón proyectado).

Naturalmente, el procedimiento puede utilizarse en zonas difíciles como preanillo de sostenimiento, completándose después de la sección con un revestimiento de hormigón con encofrado convencional.

Revestimiento con dovelas prefabricadas

Los revestimientos de dovelas prefabricadas de hormigón armado han experimentado en los últimos tiempos una expansión espectacular debido al crecimiento de infraestructuras urbanas subterráneas excavadas con escudos.



Foto 10.- Revestimiento de tunnel con dovelas prefabricadas

Las dovelas prefabricadas van unidas a los escudos, del tipo que sea, cada vez más utilizadas para túneles largos de saneamiento, carreteras y de ferrocarriles metropolitanos.

Sin embargo, la utilización de escudos de diámetros cada vez mayores, está ampliando los campos de aplicación de las dovelas para obras de grandes túneles que, hasta hace poco era campo exclusivo de los revestimientos de hormigón tradicionales.

Un revestimiento prefabricado se compone de una serie de anillos yuxtapuestos que, a su vez, están formados por un número variable de dovelas. Este tipo de revestimiento se empezó a instalar en Inglaterra a partir de los años 30, en túneles hidráulicos de pequeño diámetro, sustituyendo a los revestimientos de fundición utilizados hasta entonces.

Hay que advertir que las variedades y distintas combinaciones de los elementos que intervienen en la definición de las dovelas permiten una serie prácticamente limitada de posibilidades, por lo que resulta imposible abarcar todos ellos en este capítulo.

Tipo de anillos

Se pueden distinguir dos tipos de anillos que estén limitados en planta por planos paralelos o no paralelos.

En el primer caso, anillos rectos, se comprende fácilmente que solo pueden ser utilizados para tramos rectos. En el segundo caso, anillos troncocónicos, se utilizan para describir curvas. Asimismo, es posible utilizar este tipo de anillos para tramos rectos alternando su colocación.

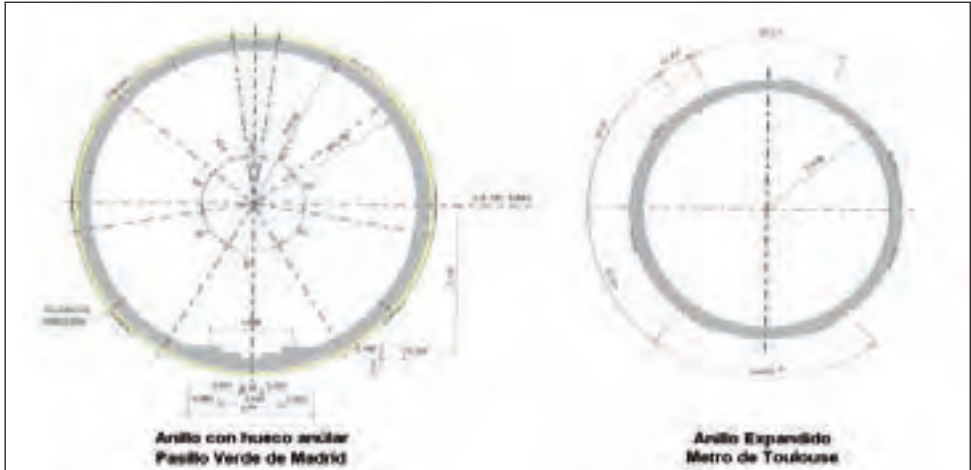


Figura 20.- Detalle de dos tipos de anillos

La conicidad de los anillos troncocónicos suele definirse en función del radio mínimo del trazado en planta correspondiente. Los anillos están constituidos, a su vez, por elementos llamados dovelas.

El número de dovelas se determina, en cada caso, en función, fundamentalmente, del diámetro del túnel. La tendencia actual es la de limitar el número de dovelas por anillo, ya que, de esta manera, se reduce el ciclo de colocación, con la consiguiente ganancia en el plazo de ejecución.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que esta limitación comporta un aumento del peso de las dovelas, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de dimensionar el elemento erector del escudo.

También ligado a este aspecto, está la elección del ancho de la bóveda, que es, normalmente de 1,50 m. Sin embargo, se encuentran en el mercado anchos entre 1,00 y 1,70 m.

A título de ejemplo, en secciones grandes se utilizan hasta 9 dovelas más llave, mientras que en secciones más pequeñas pueden utilizarse 5 dovelas más llave.

De todas formas, esto no puede tomarse como una regla general, ya que, por ejemplo, en el túnel bajo el Canal de la Mancha, de 8,7 m de diámetro se utilizaron en el lado francés 5 dovelas más llave mientras que en el lado inglés la disposición fue 8 dovelas más llave.

En cuanto a la trabazón del anillo, se consigue mediante la colocación de un elemento final, llamado dovela de clave que puede ser a su vez, de dos tipos:

- Longitudinal, con forma de trapecio cilíndrico, si es posible introducirla longitudinalmente
- Radiales, limitada por planos convergentes en el extradós del anillo, que pueden ser introducidas radialmente.

La configuración del anillo descrita anteriormente hace que, en general, existan tres tipos de dovela, en cuanto al lugar que ocupan en el anillo:

Dovelas, que podrían llamarse corrientes.

Dovela de solera, que puede ser igual que las otras o, más frecuentemente, llevar incorporadas unas plataformas para la rodadura del back-up del escudo y una canaleta de desagüe.

Dovela de llave, cuya finalidad se describió anteriormente.

El tipo actualmente más utilizado y que se adapta a cualquier tipo de terreno, está formado por anillos de dovelas que se montan al abrigo de la coraza del escudo y que van siendo extraídas, según el avance, quedando un hueco anular entre el extradós del anillo y el terreno que es posteriormente inyectado.

Otro tipo es aquel en el que los anillos se montan fuera del abrigo del escudo y que son expandidos contra el terreno, denominados revestimientos expandidos.

Como se deduce, el corte del terreno debe ser regular, ya que si existieran huecos o desprendimientos, pueden producirse flexiones que dañan la dovela, este tipo ha sido muy utilizado en Inglaterra (Londres), la arcilla típica de esta zona permite una excavación regular.

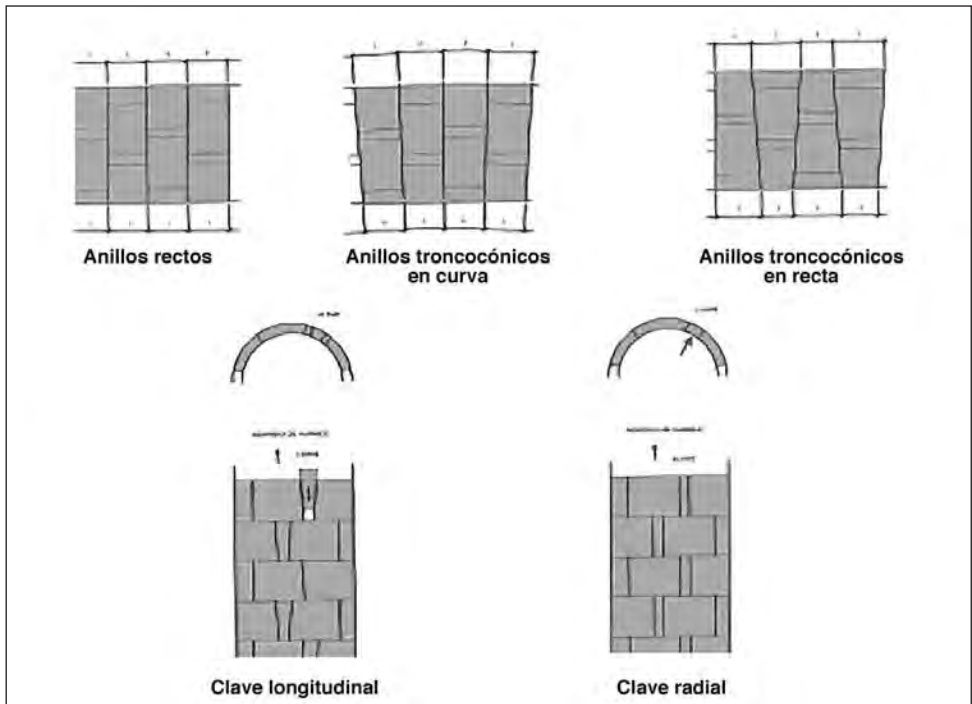


Figura 21.- Tipos de anillos y dovelas en revestimiento de túneles

Las dovelas al ser elementos de gran esbeltez y sometidos a esfuerzos de manipulación, así como a las cargas del terreno, precisan de una cuantía de armadura que les permitan soportar dichas acciones. Las armaduras que se diseñan en una dovela deben de responder a las necesidades siguientes:

Armaduras de flexión: Dispuestas en sentido circunferencial, y destinadas a soportar las tracciones originales por la manipulación y las cargas del terreno, también se disponen las de reparto en sentido longitudinal.

Armaduras de refuerzo en juntas radiales: Dispuestas para esfuerzos de compresión elevados, este tipo de armaduras son muy necesarias en túneles profundos, con el anillo trabajando a compresión.

Armaduras de refuerzo en juntas circunferenciales: Dispuestas para absorber el empuje de los gatos del escudo.

Refuerzos: Dispuestas en forma de cercos en los tornillos de fijación.

A modo de ejemplo y como orden de magnitud, las cuantías habituales oscilan entre 40 kg/m³ y 180 kg/m³.

Juntas y elementos de fijación

Con carácter general, la impermeabilización de este tipo de revestimiento se ha venido confiando a tres sistemas diferentes:

- En primer lugar a la colocación en las juntas de la dovela de unas bandas o tiras de impermeabilización (impermeabilización primaria).
- En segundo lugar, una vez colocadas las dovelas en su posición, a la inyección del espacio que queda entre la superficie excavada y el anillo de dovelas construido (impermeabilización secundaria).
- Por último, mediante la construcción de un revestimiento secundario interior de hormigón (impermeabilización terciaria).

En realidad, sería más correcto decir que la inyección del trasdós de las dovelas cumple la misión de ser la impermeabilización primaria, ya que, en la práctica, es la primera barrera que encuentra el agua freática en su recorrido hacia el interior del túnel, siendo la secundaria la que proporciona las juntas.

Indudablemente, el sistema de impermeabilización a utilizar debe basarse en un adecuado conocimiento de las características hidrogeológicas de las diferentes zonas a atravesar por el túnel y en una adecuada valoración económica de los posibles sistemas a emplear.

También son muy importantes tanto la función del túnel, como las particularidades del entorno. Normalmente, estas bandas impermeabilizantes están fabricadas con cauchos de etileno-propileno (E.P.D.M.) termopolímeros, o de policloropreno (CR), vulgarmente conocido este compuesto bajo la denominación de neopreno, ya que éste fue el nombre comercial del primer caucho fabricado en este compuesto a escala industrial.

Las bandas se encuentran alojadas en unos rebajes situados en las juntas, muy próximos al extradós, construidos a tal efecto en las juntas radiales y circunferenciales de las dovelas.

El encaje de las bandas de los rebajes se hace normalmente a presión o mediante el empleo de resinas. Las bandas funcionan fundamentalmente por la compresión que sufren ante los esfuerzos que les transmiten los tornillos de fijación con los que se unen las dovelas.

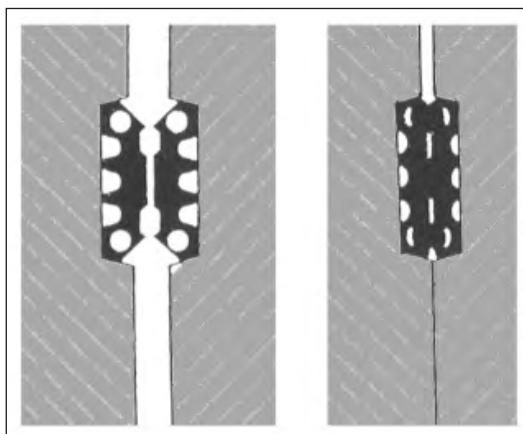


Figura 22.- Detalle de juntas para sellado de dovelas

Además de las juntas entre las dovelas que constituyen un anillo del revestimiento (juntas radiales), existen las de unión entre los anillos (juntas circunferenciales), en las que las bandas de estanqueidad también funcionan por deformación bajo presión, en este caso la que transmiten los gatos de la tuneladora al hacer reacción en el último anillo construido.

Otro tipo de banda que se ha empleado con gran profusión, especialmente en Francia, es la que se denomina en la práctica como hidroexpansiva o, simplemente, expansiva.

Este tipo de material se fabrica con polímeros que expanden en presencia de agua hasta diez veces su volumen inicial. Al igual que las bandas que funcionan por compresión, éstas se alojan también en los rebajes de las dovelas.

Actualmente, la tendencia es la de abandonar el empleo de los materiales hidroexpansivos, ya que se desconfía de su comportamiento a largo plazo. Probablemente, el mayor interés que puede haber tenido en la práctica a utilización de este tipo de bandas de estanqueidad mixtas, haya sido el de eliminar los trabajos de inyección finales, habituales y necesarios, antes de la entrada en servicio, de las obras de aquellas pocas juntas que hayan podido presentar alguna filtración.

Revestimientos con paneles prefabricados

Se trata de revestimientos cuya misión es únicamente estética o de protección y que no tienen ninguna misión resistente. A continuación, se citan algunos de los productos que se utilizan más usualmente:

Tipo Glasal: Paneles de fibra de cemento de 4 a 8 mm de espesor

Tipo Robertson: Chapa de aluminio con una capa de poliéster en el extradós.

Tipo Pentagon: Paneles de 6 mm de porcelana de acero esmaltado en el extradós; 4,8 mm de fibra de cemento y 0,6 mm de porcelana de acero esmaltado en el intradós).

GFRC (glass fiber reinforced concrete): Paneles de 13 mm de espesor.

GRC (glass reinforced concrete): Similar al anterior.

Hormigón: Armado en paneles de espesor de 6 a 10 cm.



Foto 11.- Emboquille de un túnel revestido con paneles

Normalmente, se trata de productos resistentes al fuego y de fácil limpieza, por lo que su empleo suele restringirse a túneles urbanos. La forma de colocación es muy variada, aunque normalmente se realiza mediante largueros y bastidores anclados al parámetro del túnel.

El problema de este revestimiento lo constituye su precio. Además, en los túneles de carreteras puede suceder que, al impactar un vehículo contra ellos, caigan un buen número de paneles, con el consiguiente riesgo para el usuario.

4.2 Diseño y ensayos del hormigón de revestimiento

Las crecientes exigencias técnicas de Proyecto para los hormigones de revestimiento de túneles, junto con el objetivo permanente de optimización económica de cada obra, nos han conducido al desarrollo de nuevos productos, y a la implementación de sistemas de ensayo y control, capaces de simular de forma adecuada las condiciones de fraguado de los hormigones en una puesta de este tipo.

Dadas las dimensiones de las probetas cilíndricas de hormigón, y el volumen alojado en el carro de encofrado, existe un factor de escala, fundamentalmente relacionado con el calor generado en la reacción de hidratación del cemento en el fraguado en ambos casos.

Este factor de escala, dificulta la extrapolación directa entre las Resistencias a Compresión Simple obtenidas en el control de calidad de la obra de forma convencional (rotura de probetas cilíndricas almacenadas según las prescripciones de la EHE), y las esperables en el carro de encofrado. Este punto se convierte en fundamental en las fases iniciales de diseño de estos hormigones, influyendo diversos factores:

- Resistencia Característica de Proyecto
- Resistencia mínima proyectada para mover el carro
- Características de la planta de hormigón
- Distancia de transporte desde la planta de hormigón hasta el túnel
- Tipo y cantidad de cemento
- Tipología, naturaleza, y cantidad de los áridos empleados

- Relación Agua/Cemento (A/C)
- Temperaturas de los diferentes componentes del hormigón y de la mezcla lista para su uso (To)
- Condiciones geológicas del túnel (Ej. Monteras de escasa potencia con filtraciones importantes de agua de escorrentía con el consiguiente enfriamiento del hormigón de la clave)

Los hormigones de revestimiento son generalmente bombeables, manteniendo su trabajabilidad durante un plazo de tiempo adecuado, en función de las distancias (tiempos) requeridas en cada caso, al tiempo, que deben cumplir con las resistencias exigidas.

Por todo ello, **Sika, S.A.U.** ha comprometido sus esfuerzos de I+D+i, trasladando las experiencias reales de las numerosas obras y pruebas previas realizadas, para poner en el mercado productos capaces de garantizar las exigencias actuales.

Asimismo, Sika, S.A.U. lleva tiempo incorporando sistemas específicos de ensayo en las fases de diseño de estos hormigones:

- i) Sistema Sika Adiabático Seco
- ii) Sistema Sika Adiabático de Inmersión



Foto 12.- Detalle del Sistema Sika Adiabático de Inmersión

La metodología propuesta para la realización de los ensayos específicos previos durante la fase de diseño de los hormigones de revestimiento comprendería:

- Elección del perfil de calentamiento de las pruebas, para simular convenientemente las condiciones de fraguado en el carro
- Simulación del perfil designado con sistemas apropiados, para obtener valores representativos
- Control de la trabajabilidad, de las resistencias a edades tempranas, y de las resistencias a 28 días del hormigón

El primero de los puntos, es especialmente crítico, ya que condiciona los resultados de las pruebas de diseño. Por este motivo, se han desarrollado los sistemas de simulación mencionados, que permiten trabajar del lado de la seguridad, con una aproximación adecuada a la realidad del problema.

En función de la información recopilada, se puede partir de:

1. Un perfil teórico de temperaturas/tiempo
2. Un perfil de temperaturas/tiempo, obtenido de registros directos en muretes del túnel o en puestas de ensayo
3. Un perfil real de temperaturas/tiempo, registrado en carros de labores anteriores con el mismo hormigón

La verosimilitud de los resultados, dependerá de la extensión del muestreo, y del perfil de partida. Lógicamente, un perfil teórico puede diferir de la realidad más que un registro real, siendo recomendable repetir éstos varias veces, para reducir las dispersiones de datos.

Sika, S.A.U. dispone de equipos de registro de alta precisión, capaces de almacenar las temperaturas del hormigón, introduciendo sensores recuperables en el mismo (véase Foto 20).

Posteriormente, se descargan los datos registrados al PC con el Software del equipo, y se representan gráficamente para su mejor interpretación.



Foto 13. - Sonda de temperatura colocada en el murete de un túnel

En la gráfica que se muestra a continuación se representa la temperatura del hormigón en un murete y la temperatura ambiente en el túnel.

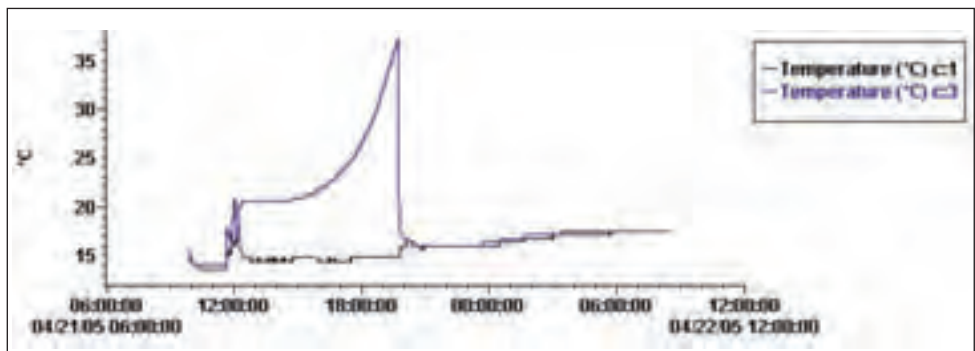


Figura 23. - Registro de temperatura del hormigón en un murete

La zona de interés corresponde a los datos medidos entre las 12:00 h y las 20:00 h, apreciándose el incremento de temperatura en el hormigón.

No obstante, parece indicado reseñar, que los registros de temperatura en este tipo de puestas pueden alejarse de forma importante de las temperaturas reales del carro.

La causa de esta divergencia, es fundamentalmente la relación entre la superficie espuesta del murete (toda la superficie superior) y el volumen total de hormigón. Las corrientes que se generan en el interior de los túneles, especialmente en épocas frías, pueden disipar importantes cantidades de calor, enfriando la masa de hormigón y generando registros engañosos de la temperatura.

El siguiente paso, corresponde a la simulación de las condiciones de fraguado del hormigón. Según se ha comentado anteriormente, disponemos de dos sistemas diferentes de trabajo para las pruebas de diseño, ampliamente ensayados.

Por un lado, el Sistema Sika Adiabático Seco, consistente en un cajón sellado térmicamente con capacidad para almacenar seis moldes de probetas. Este sistema permite la colocación de una resistencia eléctrica en el interior para aportar calor cuando se estime necesario.

Dado que no existe ningún tipo de normativa en la que se contemple un sistema de simulación para hormigones de altas resistencias iniciales, como pueden ser los casos de los hormigones de revestimientos en túneles, Sika en su constante preocupación por mejorar los sistemas de medición y control ha desarrollado el Sistema de Cajón Adiabático de Inmersión.

Este sistema fundamentalmente persigue conseguir que las probetas cilíndricas de hormigón que se van a romper a compresión a temprana edad (entre las 6 y 12 horas de su fabricación) se encuentren en las mismas condiciones que el hormigón estructural de referencia.

La metodología de las pruebas consiste en mantener las probetas de hormigón en todo momento a la misma temperatura que el hormigón embebido dentro del carro de encofrado.

Para ello, se debe introducir una sonda termopar en el último hormigón bombeado en la estructura, la cual se traslada a una caja informatizada que a su vez pone en marcha una resistencia que segundo a segundo va calentando el baño de agua en el cual se sumergen las probetas de hormigón.



Foto 14.- Sistema Sika Adiabático de Inmersión en un ensayo en túnel

Así, a medida que aumenta la temperatura del hormigón, la caja informatizada pone automáticamente en marcha una resistencia sumergida en el cajón adiabático que calienta dicha agua en poco tiempo hasta alcanzar la temperatura de referencia.

De esta forma, se consigue tener en todo momento en las mismas condiciones de temperatura las probetas cilíndricas de hormigón y la estructura de referencia, en nuestro caso el hormigón de revestimiento del túnel.

Posteriormente se van extrayendo las probetas, se desmoldan y se van rompiendo en una prensa de hormigones convencional para obtener la Resistencia a Compresión Simple a la edad correspondiente.

Mediante la utilización de este sistema se dispone de una información real, que facilita el posterior control de calidad y la toma de decisiones relativa al movimiento del carro de encofrado.

4.3 Gama sika para hormigón de revestimiento

La gama de productos comprende:

- ▲ **SIKAMENT T-3412** - Superplastificante de altas resistencias iniciales a base de copolímeros vinílicos modificados
Para hormigones donde se exija una gran calidad estructural y elevadas resistencias iniciales. Exento de cloruros. Densidad: aprox. 1,15 kg/l. Cumple la norma ASTM-C494-81 Tipo A UNE-EN 934-2
- ▲ **SIKAMENT T-1405** - Superplastificante a base de naftaleno formaldehído sulfonado. Densidad: aprox. 1,2 kg/l
- ▲ **SIKA VISCOCRETE T 5980** - Superplastificante de altas prestaciones y de tercera generación. Policarboxilatos modificados en base acuosa. Densidad: aprox. 1,07 kg/l
- ▲ **SIKA RAPID 1** - Acelerante de endurecimiento exento de cloruros. Para conseguir resistencias mecánicas entre 5 y 15 horas, manteniendo las resistencias a 28 días. Densidad aprox.: 1,2 kg/l
- ▲ **SIKASET 3** - Acelerante de fraguado exento de cloruros. Para conseguir resistencias mecánicas entre 5 y 10 horas, manteniendo las resistencias a 28 días. Densidad aprox.: 1,25 kg/l

5 REPARACIÓN DE TÚNELES

No cabe duda, de que desde 1933 (1ª aplicación de gunita en España) hasta nuestros días, las aplicaciones del hormigón proyectado han obtenido una extensa innovación, tanto en el campo de los materiales, de la maquinaria y de las técnicas, como a los conceptos de su aplicación.

Esta innovación se debe en gran medida al desarrollo de la industria de los túneles y a la utilización del hormigón proyectado como “herramienta” en el Nuevo Método Austriaco (NATM).

Existe en la actualidad una amplia variedad de posibilidades y ofertas. En el periodo comprendido entre los años 1992-2010, las consideraciones medioambientales y los objetivos tecnológicos de las empresas de química para la construcción y de los fabricantes de maquinaria actuales han desarrollado cambios en la técnica de proyección de hormigones en las obras de España, dando lugar a hormigones proyectados de altas prestaciones, los cuales se pueden diseñar, dosificar, fabricar y utilizar en múltiples aplicaciones dentro de la Edificación y la Ingeniería Civil.

Dando un repaso a las nuevas tecnologías y sobre todo en las altas prestaciones, podemos situarnos en su estado actual y considerar los siguientes aspectos:

- ▲ Producción económica de un hormigón proyectado, neutro y ecológico, caracterizado por su alta calidad, durabilidad y baja permeabilidad
- ▲ Reducción de la permeabilidad
- ▲ Reducción de rebote y polvo en la proyección
- ▲ Mejora del comportamiento a la deformación sin reducción de resistencias
- ▲ Hormigón proyectado de altas prestaciones
- ▲ Hormigón proyectado de bajo módulo de elasticidad
- ▲ Hormigón proyectado de alta resistencia al fuego
- ▲ Integración del hormigón proyectado como elemento estructural en túneles
- ▲ Sustitución del revestimiento tradicional por hormigón proyectado

Es por ello, que la aplicación de un hormigón proyectado de altas prestaciones en la reparación de túneles tiene un lugar importante por lo que recorreremos, y repasaremos en detalle, sus aplicaciones, los métodos utilizados y los conceptos fundamentales. Incidiremos de forma especial en cuatro capítulos importantes relativos a la reparación con hormigón proyectado como son:

- ▲ Altas resistencias / durabilidad / bajo módulo elasticidad / resistencia al fuego

5.1 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión simple es uno de los principales parámetros de control y diseño del hormigón proyectado. Las recientes aplicaciones e investigaciones en esta área permiten alcanzar hormigones proyectados de hasta 75 MPa de resistencia a compresión característica a 28 días.

Aunque el diseño y la utilización de un HM 45 según norma UNE 83-607-94 se puede utilizar hoy en día sin problemas, (algunos proyectos lo contemplan). Sin embargo, la demanda actual para la aplicación en túneles por el método NATM, debido al establecimiento de una excavación con sostenimiento temporal se mantiene en HM 30.

Cuando la excavación se efectúa con un sostenimiento permanente es donde el diseño necesita de un hormigón proyectado de mayores resistencias a compresión ($R_c > 40$ MPa), acompañado de otras características como su durabilidad, impermeabilidad y homogeneidad, por lo que las resistencias a compresión serán establecidas de acuerdo con las tecnologías más avanzadas.

Es en el campo de la reparación estructural de los túneles, donde se están realizando hormigones proyectados de altas prestaciones y con resultados muy aceptables.

5.2 Impermeabilidad

El uso exclusivo del hormigón proyectado como sostenimiento y revestimiento de túneles y galerías lleva implícito la característica de impermeabilidad. Hay que considerar que se deben proteger del agua las cerchas, anclajes y armaduras, sobre todo en los túneles donde el hormigón proyectado es el elemento estructural definitivo.

Debe representar una propiedad en el diseño para que la penetración de agua no exceda 50 mm, según ensayo de impermeabilidad UNE 83.309.90. En Europa el parámetro utilizado en la actualidad es < 3 cm.

La definición de la penetración de agua dará la característica de impermeabilidad buscada. Actualmente se está elaborando una Norma UNE que determine el ensayo de Impermeabilidad del hormigón proyectado.



Figura 25.- Permeabilidad (mm) de distintas mezclas de hormigón

5.3 Durabilidad

Para describir el término durabilidad tienen que tenerse en cuenta tres aspectos fundamentales: Los agentes externos en su sentido más amplio, la resistencia contra dichas exposiciones y el tiempo de exposición.

Por lo tanto, la durabilidad sólo puede definirse cuando se conocen los agentes externos y la influencia que tienen.

Entre dichos agentes externos podemos encontrarnos los diferentes procesos de aplicación del hormigón proyectado (que han tenido una evolución constante a lo largo del tiempo pasando de las máquinas de doble cámara a las gunitadoras de vía seca y terminando con las modernas bombas de hormigón proyectado por vía húmeda), además de la influencia que tiene el tipo de proyección (manual ó robotizada) y el curado final del hormigón.

El hormigón proyectado es cada vez más utilizado en todo el mundo, además de que el conocimiento acerca del gunitado es cada vez mayor. Un mejor know-how, unos mayores conocimientos sobre la tecnología del hormigón, un mejor desarrollo de aditivos y adiciones, y mejores cementos han llevado esta técnica a un avance increíble.

Para asegurar la durabilidad del hormigón proyectado con el paso del tiempo, es muy importante conocer las condiciones de exposición de cada estructura en particular.

De acuerdo con las circunstancias en las que se encuentre cada estructura, el hormigón proyectado estará expuesto a diferentes condiciones, temperaturas, contracciones, dilataciones, frío, calor, agua, presión de vapor de agua, abrasión o ataques químicos. La exposición más fuerte puede ser la producida por los ataques químicos, como por ejemplo el agua agresiva con altos contenidos en sulfatos.

La carbonatación también puede producir efectos nocivos en el hormigón proyectado si el recubrimiento de las armaduras fuera insuficiente. Esto se debe achacar a una mala ejecución y no a un defecto del hormigón proyectado, pero en cualquier caso, se produce una pérdida en la permeabilidad del hormigón proyectado que influye negativamente en la resistencia contra la carbonatación.

Otros aspectos acerca de la durabilidad siguen siendo cuestionables, especialmente cuando nos preguntamos a nosotros mismos cómo se define la durabilidad y cómo debe medirse. ¿Qué criterios son los más importantes a la hora de definir la durabilidad, las resistencias a compresión, la estructura, la adherencia al soporte, la aparición de fisuras?.

La durabilidad puede definirse como una medida de los cambios que se producen en ciertos valores con el paso del tiempo.

¿Puede definirse un tiempo de durabilidad como tal literalmente hablando? ¿No sería mejor debido al desconocimiento existente en la actualidad comenzar con lo que se conoce perfectamente bien, como puede ser el tiempo de resistencia a diferentes exposiciones?

En vez de un tiempo de durabilidad indefinido que no pueda ser cuantificado, deberíamos centrarnos en el estudio de valores más usuales como la porosidad, el módulo de elasticidad, la resistencia al hielo, la permeabilidad, la adherencia, la resistencia a los ataques a los sulfatos, factores en donde el factor tiempo puede evaluarse (p.e. el módulo de elasticidad a los 30 años).

En España, según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE:

“La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural”

Por lo tanto, el proyecto deberá definir las formas y los detalles estructurales que faciliten la evacuación del agua y sean eficaces frente a los posibles mecanismos de degradación del hormigón.

Durante la ejecución se recomienda atender a los siguientes puntos:

- ▲ Selección de formas estructurales adecuadas
- ▲ Calidad adecuada del hormigón, en especial de su capa exterior
- ▲ Adopción de espesor de recubrimiento adecuado para proteger las armaduras
- ▲ Control del valor máximo de abertura de fisuras
- ▲ Disposición de protecciones superficiales en ambientes muy agresivos
- ▲ Adopción de medidas contra la corrosión de las armaduras

5.4 Bajo módulo de elasticidad

Una característica interesante como nueva tecnología del hormigón proyectado es la disminución de su módulo de elasticidad, acompañada de una alta resistencia a compresión: Esta herramienta es apropiada para el diseño de revestimientos estructurales de pequeño espesor, debido la aplicación en:

- ▲ Impermeabilizaciones posteriores de túneles
- ▲ Reparaciones estructurales de túneles existentes
- ▲ Refuerzos y protecciones de estructuras

Y en general, allí donde se necesite un hormigón proyectado de altas resistencias y bajo módulo de elasticidad. Su aplicación en la impermeabilización posterior de túneles y galerías existentes es un campo complejo de la ingeniería civil, debido a los costes de mantenimiento, a las exigencias de circulación, y sobre todo, a su influencia en el mantenimiento del gálibo (espesores de revestimiento < 8 cm).

Es importante la elección y la distribución correcta de los materiales con respecto a las condiciones de un determinado lugar, de acuerdo con las consideraciones del tránsito. Es necesario tener en cuenta los factores siguientes:

- ▲ Condiciones del terreno y tipo de construcción existente
- ▲ Condiciones del agua y en qué estado se encuentra
- ▲ Grado de impermeabilización requerido como consecuencia del uso del túnel
- ▲ Elementos necesarios y específicos del sistema de impermeabilización
- ▲ Acciones a las que puede estar expuesta la impermeabilización

La penetración de agua por las fisuras del revestimiento estructural, tanto de hormigón como de mampostería, amenaza el comportamiento de los revestimientos y las instalaciones mecánicas, por el efecto del hielo tanto en las boquillas como en los túneles cortos.

El agua de filtración conduce en invierno a la formación de hielo en la superestructura, con el consi-

guiente peligro para la circulación de trenes o vehículos, y da lugar a eflorescencias y concreciones calcáreas sobre la superficie interior del revestimiento, con la consiguiente lixivación del hormigón o la destrucción de la mampostería.

El diseño de la impermeabilización posterior de un túnel tiene que tener en cuenta los drenajes y su protección estructural impermeable. El drenaje asegura la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes o cunetas longitudinales.

Dichos drenes deberán tener el diámetro suficiente (> 20 cm) y sus aberturas de entrada proporcionales al agua de filtración esperada. La protección estructural como revestimiento, deberá adaptarse al soporte existente en espesores mínimos, ser impermeable, tener una buena adherencia y sobre todo tener un módulo de elasticidad similar al soporte. Siendo el hormigón proyectado impermeable polimérico el indicado.

Por lo tanto las características mínimas necesarias serían:

Resumen de Características Técnicas mínimas necesarias para un Hormigón Proyectado Polimérico

Adherencia al soporte:	$> 1\text{N/mm}^2$
R. a compresión a 28 días:	> 35 MPa
R. a flexión a 28 días:	> 50 kg/cm ²
Módulo de elasticidad a 28 días:	< 210.000 kg/cm ²
Absorción capilar curado a 7 días:	$< 1,2$ g/cm ²
Penetración de agua:	< 2 cm

Este tipo de hormigones proyectados se consigue con la utilización de aditivos y adiciones especiales a base de humo de sílice y resinas acrílicas, que confieren las propiedades necesarias de adherencia, altas resistencias, impermeabilidad, durabilidad y bajo módulo de elasticidad.

5.5 Resistencia al fuego

El hormigón ordinario aunque, durante periodos cortos de tiempo, posee un buen comportamiento frente a las altas temperaturas, no es el material idóneo cuando ha de estar sometido a éstas de una forma permanente o a cambios bruscos de las mismas, tal y como puede ocurrir en los incendios de túneles, en su aplicación en hornos industriales o domésticos y en instalaciones en las que se trabaja con productos a altas temperaturas.

En estos casos, es imprescindible disponer de un hormigón especial en el que el cemento, los áridos e incluso, las fibras, cuando sea preciso incluirlas, sean aptos para resistir a estas temperaturas.

La resistencia de un material frente a las altas temperaturas se determina mediante un ensayo realizado con conos Segel fabricados con el mismo. Según el comportamiento de estos conos pirométricos podemos hacer la siguiente clasificación:

- Materiales resistentes al calor, aquellos que tiene un punto de fusión del cono de 1.520°C
- Materiales refractarios, cuando esta temperatura está comprendida entre 1.520 y 1.830°C
- Materiales altamente refractarios cuando esta temperatura es superior a los 1.830°C

Un material se dice que se comporta bien frente a las altas temperaturas cuando, no funde, la modificación de sus formas es mínima al someterlo a cargas, las variaciones de temperatura no

entrañan modificaciones sensibles de volumen, no se producen entumecimientos ni contracciones debidas a transformaciones químicas y no aumenta su sensibilidad a los agresivos químicos.

Cada material tiene una temperatura límite superior hasta la que se puede llegar cumpliéndose las condiciones anteriormente indicadas, y la temperatura indicada por el ensayo con conos Segel para este material es bastante superior a la temperatura límite anteriormente referida.

En los hormigones confeccionados con **cemento Pórtland**, al elevar la temperatura de los mismos se producen ciertas transformaciones propias de la pasta de cemento y en las que juega un papel importante, el agua libre, la de los compuestos hidratados y especialmente, el hidróxido cálcico formado.

Con **cemento Portland**, al elevar la temperatura de un hormigón sufre el siguiente proceso:

- ▲ **Entre 100 y 200°C:** Se evapora el agua libre existente entre los capilares e inicia su evaporación el agua absorbida por el gel
- ▲ **A los 400°C:** Como consecuencia de la desecación producida se tiene una retracción importante que queda disimulada por la simultánea dilatación térmica que en parte se compensa
- ▲ **Entre los 400 y 800°C:** El agua químicamente unida al hidróxido cálcico y a los hidratos procedentes de la hidratación del cemento se libera y la pasta comienza a desagregarse bajando su resistencia de forma rápida
- ▲ **A los 900°C:** Se produce un aumento de resistencias como consecuencia de las reacciones cerámicas que se producen a esas temperaturas entre el cemento y los áridos semifundidos. Si en este estado se enfría el hormigón y al mismo tiempo absorbe humedad se producen reacciones violentas de hidratación del óxido cálcico que harán que la pasta se desagregue debido a la fuerte expansión que se produce en la formación del hidróxido

Por otro lado, si se emplea cemento Aluminoso, al elevar la temperatura del hormigón:

- ▲ No se tienen estas limitaciones al no producirse en su hidratación hidróxido cálcico, pudiéndose por consiguiente, emplear el cemento aluminoso gris, rico en óxido de hierro, en la preparación de hormigones refractarios que pueden soportar hasta 1.300 ó 1.350°C y el cemento aluminoso blanco, cuando las temperaturas puedan llegar a los 1.800°C y siempre que con ambos hormigones se utilicen áridos refractarios

En el comportamiento de los áridos frente a las altas temperaturas nos encontramos con que este es diferente según sea la constitución de estos y así los áridos normalmente empleados en los hormigones ordinarios no son los más idóneos para resistir altas temperaturas pues:

Áridos calizos: Empiezan a sufrir transformaciones a los 700°C y a los 800°C se descomponen en óxido de cal y anhídrido carbónico perdiendo en gran parte sus resistencias.

Áridos silíceos: Sufren transformaciones cristalinas acompañadas de fuertes expansiones a partir de 575°C, especialmente, al pasar el cuarzo a las formas alotrópicas de cristobalita y tridimita.

Del comportamiento simultáneo de cemento Portland y de los áridos normales empleados en la confección del hormigón tradicional vemos que este no debe emplearse con temperaturas superiores a los 400°C, por efecto del cemento.

Con cemento aluminoso, y áridos ordinarios, solamente alcanzaríamos un techo de 500°C, y únicamente conseguiremos techos más elevados mediante el empleo de cemento aluminoso y áridos refractarios.

Los áridos refractarios a emplear con el cemento aluminoso deben tener entre otras propiedades, una gran estabilidad de volumen y un elevado punto de fusión.

Para temperaturas poco elevadas se emplean áridos ricos en sílice, como basaltos, diabasas, piedra pómez, escorias de horno alto, ladrillo cerámico ordinario, etc., para temperaturas medias altas, áridos ricos en alúmina, ladrillos refractarios machacados con más del 25 por 100 de alúmina, etc., y para altas temperaturas, áridos especiales, cromita, magnesita, corindón, etc.

Prácticamente y salvo casos especiales los áridos más utilizados son los procedentes de machaqueo de ladrillos refractarios limpios de yesos, mortero o cualquier otro producto con el que hayan estado en contacto.

Los áridos refractarios ligeros tales como escorias de horno alto, arcillas expandidas, piedra pómez, etc., tienen la ventaja de proporcionar hormigones refractarios que poseen además, una gran capacidad de aislamiento térmico.

5.5.1 Hormigón resistente al fuego para revestimientos estructurales y reparación de túneles

En los últimos 25 años, el número de incendios tanto en túneles carreteros como de ferrocarril, ha sido importante, sobre todo en lo concerniente a pérdida de vidas humanas. Además, los costos de reparación, y la interrupción en el servicio del túnel, han sido significativos.

Desde hace unos años se está imponiendo el empleo como adición en el hormigón de revestimiento de las Fibras de polipropileno Sikafiber M-12.

Dichas fibras de polipropileno, al incorporarse a la mezcla del hormigón de revestimiento se distribuyen uniformemente. Normalmente se emplean en una dosificación variable entre 1 y 2 kg/m³ de hormigón.

El efecto de las fibras en el hormigón es actuar en caso de incendio como un “desahogo” de las tensiones de deformación que se producen en el interior del mismo.

Así, en el caso de contacto con el fuego (a 160°C) de una estructura adicionada con fibras de polipropileno, éstas se evaporan produciendo una serie de huecos intersticiales dentro del hormigón por los cuales se aliviarán las tensiones generadas por el vapor de agua.

Una posible alternativa a las fibras son los morteros predosificados que actúan como barrera térmica Sikacrete 213 F.

A continuación se realiza una exposición técnica y científica de los efectos de la utilización de las fibras de polipropileno como protección frente al fuego.

HISTORIA DE FUEGO EN TÚNELES

Año	Túnel	Longitud	Muertos	Material
1978	Velsen, Holanda	770	5	
1979	Nihonzaka, Japón	2045	7	Eter
1980	Kajiwara, Japón	740	1	Pinturas
1982	Caldecott, Oakland, USA	1028	7	Gasolina
1983	Pecorile, Savone Italia	600	8	
1986	L'arme, Niza Francia	1106	3	
1987	Gumefens, Berna Suiza	340	2	
1993	Serra, Ripoli, Italia	442	4	
1994	Huguenot, Suráfrica	3914	1	
1995	Pfander, Austria	6719	3	
1996	Isola delle Femmine, Italia	148	5	
1999	Mont Blanc, Francia/Italia	11600	39	
1999	Tauern, Austria	6400	12	Pinturas/Lacas
2000	Kaprun, Austria	3300	155	
			252	

Túnel kaprun 11 nov. 2.000

El túnel de Kaprun tiene 4,2 m diámetro, con una inclinación de 43°, y una longitud de 2,7 km, excavado con TBM, sin revestimiento, solo con bulones de cosido de 2-3 m de longitud, para estabilizar los bloques sueltos de roca y crear un arco resistente en unos 600 m de túnel.

Los daños aparecidos en la roca, después del incendio (las temperaturas excedieron de 1.000° C), en las proximidades del mismo (100 m), han sido la perdida superficial de 3 cm de espesor de la roca en lajas, y en zonas de fracturas de diaclasas la profundidad afectada fue de 50 cm, lo que ha representado un saneamiento superficial mediante barras y martillos cercanos a las 3 t de roca. Actualmente el túnel ha sido estabilizado.

El impacto de este accidente ha llevado al estudio por parte de la "Confederation of Fire Protection Association for Europe" al estudio de las medidas de seguridad (procedimientos de escape, revestimientos, ventilación, luces de emergencia, etc., para reducir y minimizar los riesgos en caso de incendios.

Estos accidentes han dado lugar, tanto por las compañías de seguros, propietarios y organismos responsables, a que los diseñadores y consultings estudien y tengan en cuenta cuidadosamente, las causas y efectos del fuego en un túnel.

La primera prioridad es salvar la vida humana, habilitando pasajes de escape, sistemas de supresión de fuego, técnicas de ventilación, etc.



Foto 15.- Equipos de rescate y bomberos en el interior del túnel

La segunda prioridad es asegurar la integridad de la construcción y su buen comportamiento durante y después del fuego. La carga de fuego “duración y temperatura” es una medida del potencial del fuego, y puede ser reducida construyendo vehículos, estaciones y túneles con materiales no combustibles.

Cuando esto no es posible, la capacidad de propagación de combustión de los materiales debe ser ensayada para conocer el riesgo inherente, ya que en algunas situaciones pueden contribuir significativamente a aumentar la carga de fuego y aumentar el riesgo de daños.

Las investigaciones en cuanto al hormigón proyectado se refiere, arrancan en 1996 donde los fuertes daños que sufrió el hormigón del Túnel del Canal de la Mancha como resultado de la rotura explosiva del revestimiento de las dovelas durante un intenso fuego, llevó a efectuar investigaciones mas profundas sobre la protección del hormigón, un material que se consideraba muy resistente a los efectos del fuego y la temperatura.

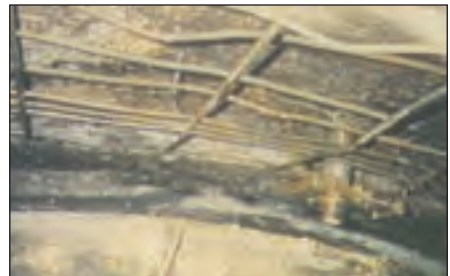


Foto 16.- Detalles del incendio en el Túnel Canal de la Mancha

Curvas tiempo – Temperatura de la evolución de fuegos. Diferentes ensayos han llevado a parametrizar el comportamiento del fuego en curvas de temperatura-tiempo. En la BS 476 e ISO 834 se propone una curva estándar referida a un fuego de celulosa, que adquiere 1000°C gradualmente después de 120 minutos.

Más recientemente, se estudió el comportamiento modelizado de un posible incendio en un túnel considerando un caso extremo, un incendio de un camión cisterna con 45.000 litros de petróleo, en un túnel de 12 m de diámetro (condiciones de fuego confinado).

El resultado es una curva que alcanza 1.200° C rápidamente, con un pico de 1.350° C después de 60 minutos y una duración del fuego de 120 minutos (Carga de fuego 300 MW).

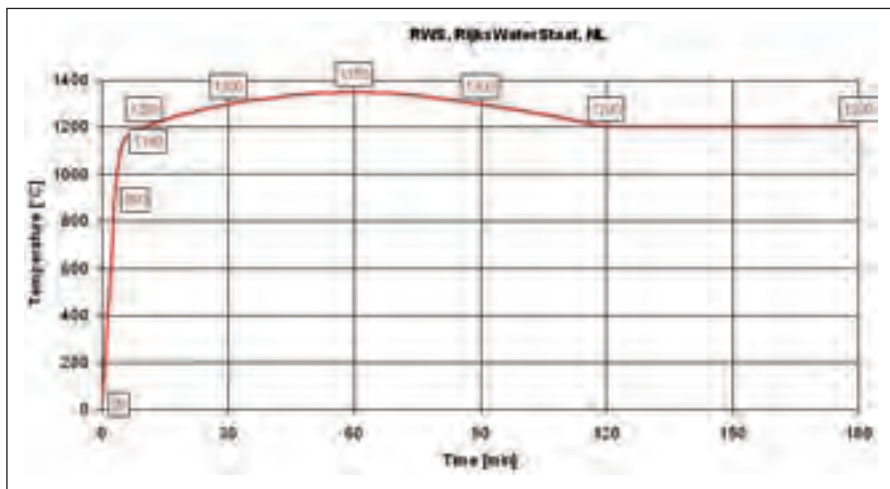


Figura 26.- Curva de carga de fuego RWS del Mº Transportes de Holanda

Integridad del hormigón. Para que un hormigón mantenga sus propiedades, después de un fuego, su “integridad”, la temperatura de la superficie del mismo no debe sobrepasar unos valores.

Estos valores han sido establecidos con un coeficiente de seguridad para que no aparezcan daños por deformaciones plásticas, despegue de la armadura, etc.

Estas temperaturas son 380°C en la superficie del hormigón y 250°C en la zona de armadura si se trata de un hormigón armado, que lo cumple si el recubrimiento es de 25 mm.

Sistemas de protección por aplicación de hormigón proyectado. Estos sistemas se basan en la aplicación de un hormigón proyectado de baja conductividad “0.1-0.4 W/m²K”, de tal manera que, con un espesor adecuado, se consiga un alto gradiente térmico para que en la superficie del hormigón no se sobrepase la temperatura de seguridad.

Los hormigones se componen de cemento o componente matriz y componentes ligeros como vermiculita, poliestireno, etc. También se adicionan fibras sintéticas que aumentan resistencia al impacto y aportan cierta flexibilidad al hormigón.

El principal problema de estos hormigones proyectados es que, al ser de bajas densidades 300-900 kg/m³, la densidad está íntimamente relacionada con la conductividad, también resultan poco resistentes a compresión

0,5-5 MPa.

Por tanto, los materiales a emplear en cada caso deberán adaptarse y ensayarse para llegar a un compromiso entre baja conductividad y resistencia suficiente.

Los resultados de muchas pruebas concluyen que 40-50 mm de espesor de estos hormigones proyectados ofrecen una protección durante 2 horas contra temperaturas superiores a las fijadas: 1.350° C.

Otra alternativa es adicionar en el propio hormigón proyectado fibras de polipropileno o vidrio (monofilamento). En las pruebas realizadas se confirma que los hormigones proyectados con fibras de polipropileno son menos sensibles a la fisuración, debido a que durante su exposición al fuego, las fibras se funden, formando unos canales de escape de las tensiones generadas.

Es necesario en este caso seleccionar unas fibras sintéticas con unas dimensiones apropiadas, evitando así que permanezcan en suspensión en el aire durante la proyección, y que puedan ser inhaladas con el consiguiente riesgo para la salud.

En definitiva todas las investigaciones y ensayos sobre hormigón proyectado con la característica de resistencia al fuego, pasan por la utilización de adiciones de fibras mixtas de acero y polipropileno, que en caso de incendio resistan en 2 horas las temperaturas del incendio.

A este respecto, hoy ya se están realizando ensayos no normalizados que determinen la diferencia entre un hormigón proyectado patrón y un hormigón proyectado con adiciones de fibras especiales.



Figura 27.- Esquema del mecanismo de rotura por acción del calor

6 INYECCIONES

La inyección, utilizada como procedimiento de construcción, tiene por objeto consolidar o impermeabilizar los terrenos sólidos porosos y permeables tales como rocas fisuradas, arenas y gravas, así como obras de fábrica defectuosas.



Foto 17.- Labores de inyección en un túnel

Para alcanzar estos resultados se rellenan los huecos del medio a tratar con un producto líquido que se solidifica, con el tiempo. Normalmente se procura alcanzar una mayor consistencia en los trabajos de consolidación que en los de impermeabilización.

Una inyección no se hace simplemente bombeando un mortero en las fisuras o huecos. El comportamiento del terreno es muchas veces incomprensible. Ni las matemáticas, ni la geología pueden preverlo. Casi siempre es necesario ver lo que ocurre al comienzo de la inyección para adoptar el método que corresponda, y es aquí donde se hace necesaria la experiencia.

No se pueden obtener resultados sistemáticos satisfactorios con la clásica lechada de cemento puro, ni con el mortero. Hay que tener una cantidad de productos y “recetas”, y saber aplicarlas con todo el conocimiento.

6.1 Tipos de inyección

Los tipos de Inyección más corrientemente empleados son:

- a) Mezcla de cemento y agua
- b) Mezcla de cemento, cenizas volantes y agua
- c) Mezcla de cemento, arena fina y agua
- d) Mezcla de cemento, arcilla y agua
- e) Mezcla de arcilla estabilizada y agua
- f) Mezcla de productos químicos gelificantes
- g) Mezcla de productos bituminosos o plásticos
- h) Mezcla de resinas de poliuretano

Las aplicaciones de Inyección se efectúan en:

- Rocas fisuradas
- Terrenos de aluvión

Y pueden ser de relleno, consolidación e impermeabilización

6.2 Productos sika para inyecciones

La gama de productos disponible comprende:

SIKA INYECCION 20 - Sistema universal para la impermeabilización de filtraciones difusas en túneles y obras subterráneas.

- Relación de mezcla 9:1
- Tiempo de endurecimiento: 6 horas
- Factor de espuma: 36 - 44

INTRACRETE EH - Aditivo para lechadas y morteros. Aumenta la fluidez en las lechadas de mortero para inyecciones de cables, anclajes y rellenos de grava. Expansión del cemento antes del fraguado

SIKADUR 52 INYECCIÓN - Resina de epoxi, baja viscosidad. Para la inyección de fisuras y grietas estructurales y consolidación de elementos mal adheridos. Densidad: 1,09 kg/l / Vida de mezcla: 60 - 75 min. a 20°C.

SIKA CABLE 1- Mortero tixotrópico para anclajes y bulonados. Se emplea en la fijación de pernos de anclaje en minería, galerías, túneles y estabilización de taludes. También empleado en la inyección y relleno de trasdós en túneles excavados con TBM.

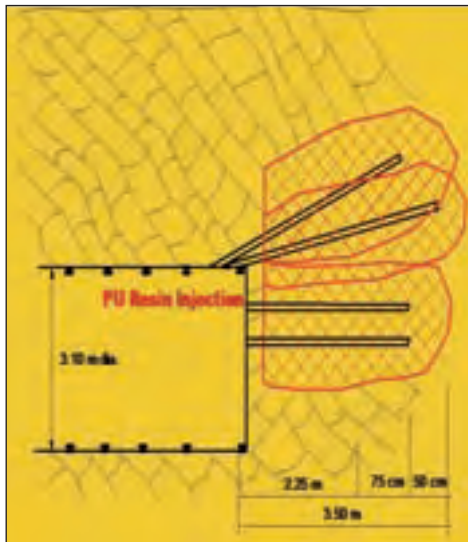
- Relación de mezcla: 1 saco de 25 kg y 5 litros de agua
- Densidad: 1,34 kg/l / Granulometría: 0 - 1 mm

SIKA INYECCION 101: Espuma de poliuretano flexible de baja viscosidad y acuareactiva. Se emplea para corte temporal de fuertes filtraciones de agua al poseer un grado de expansión libre de 40 veces al entrar en contacto con el agua. Se emplea principalmente para la impermeabilización de fisuras y juntas en el hormigón, mampostería o piedra natural.

SIKA INYECCION 105: Es una espuma de base poliuretano elástica y acuareactiva al igual que la anterior empleada para inyecciones en cortes de vías de agua temporales y fisuras o juntas con o sin movimiento con un grado de expansión de 15 veces al contacto con el agua. Se emplea también en pozos de cimentación y trabajos de pilotaje.

SIKA INYECCION 201: Resina elástica de poliuretano especialmente indicada para sellados que tengan que absorber cierto grado de movimiento manteniendo su impermeabilización permanentemente.

SIKA INYECCION 304: Gel poliacrílico elástico de inyección para impermeabilizaciones permanentes y sellados estancos así como para consolidación de terrenos no cohesivos con baja permeabilidad. También se emplea para la reparación mediante inyección de láminas de impermeabilización que hayan podido resultar dañadas.



7 IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

La Impermeabilización de túneles y, en general, de todo tipo de obras subterráneas tienen una gran importancia tanto técnica como económicamente. Contribuye considerablemente a la calidad y a la durabilidad de dichos túneles. Una óptima construcción no es lo más importante, sino la elección y la distribución correcta de los materiales con respecto a las condiciones de un determinado lugar.

En cualquier caso, no es posible establecer unas reglas generales para ello porque los factores que influyen son muchos y variados. Por eso es muy importante tener en cuenta los factores siguientes durante la planificación y el proyecto.

- ▲ Condiciones del terreno y tipo de construcción
- ▲ Condiciones del agua y en que estado se encuentra
- ▲ Grado de Impermeabilización requerido según el uso del túnel
- ▲ Elementos necesarios y específicos de la impermeabilización
- ▲ A que daños puede estar sujeta la impermeabilización

No cabe duda que una respuesta concienzuda a cada uno de estos factores daría lugar a una exposición extensa, por lo que trataremos de condensarla para dar una idea general que permita a la hora de diseñar una impermeabilización de túneles, analizar los principales factores a tener en cuenta.

7.1 Influencia del terreno y del sistema constructivo

El terreno tiene una importancia decisiva, por un lado, en el sistema de construcción y, por otro, en el tipo de revestimiento utilizado en el túnel. Estas influencias determinan la elección del tipo de impermeabilización.

En resumen y con respecto a los sistemas de impermeabilización se pueden distinguir 3 tipos de terreno:

- ▲ Terreno duro
- ▲ Terreno quebrado
- ▲ Terreno blando

En el caso de **terrenos duros**, se emplean procedimientos de excavación en grandes bloques, y dada la naturaleza del terreno el túnel es estable (por lo menos por cierto tiempo), no siendo necesario un sostenimiento previo, aunque a veces se utilice, para mayor seguridad.

En éstos no hace falta la utilización de revestimientos que soporten el terreno y que establezcan un equilibrio.

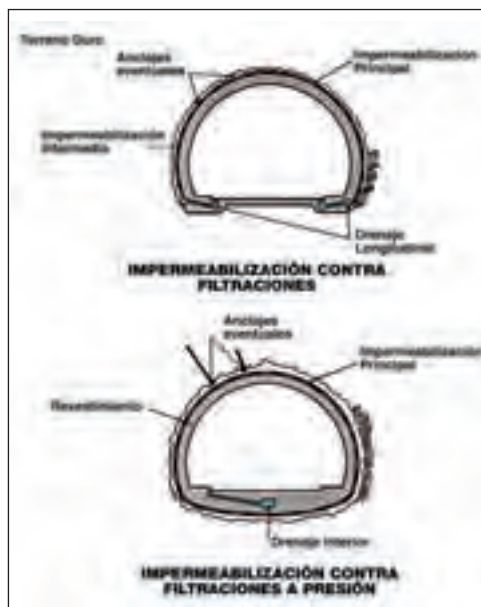


Figura 28.- Detalle para terrenos duros

Basta con eliminar irregularidades y rellenar fisuras mediante hormigón proyectado y aplicar después la impermeabilización sobre esta superficie ondulada y rugosa.

Después se revestirá con hormigón encofrado o proyectado si es necesario formar la estructura de soporte del túnel, teniendo en cuenta la presión del terreno e incluso del agua.

En el caso de **terrenos quebradizos**, no se puede construir el túnel a sección completa. Es preciso hacerlo por etapas sucesivas dando lugar a varios tipos de avance (austríaco, belga, inglés etc.).

Para ello, se realizaría un sostenimiento previo en cada fase capaz de garantizar la seguridad del túnel y, por lo tanto del avance (p.e. cerchas, bulones, hormigón proyectado etc.).

Es sobre este soporte y antes del revestimiento estructural definitivo sobre el que se realiza la impermeabilización.

En el caso de terrenos blandos (plásticos) el túnel tiene que estar construido en el espacio creado por el escudo de empuje y, por tanto, es preciso resaltar que la construcción del soporte se ha de efectuar enseguida en dicho espacio.

Existen dos tipos de impermeabilización para este tipo de terrenos:

- Sellado de juntas entre dovelas
- Una impermeabilización de superficies de dichas dovelas (en caso de dovelas reticulares o metálicas, es necesario primero igualar la superficie como soporte de la impermeabilización)

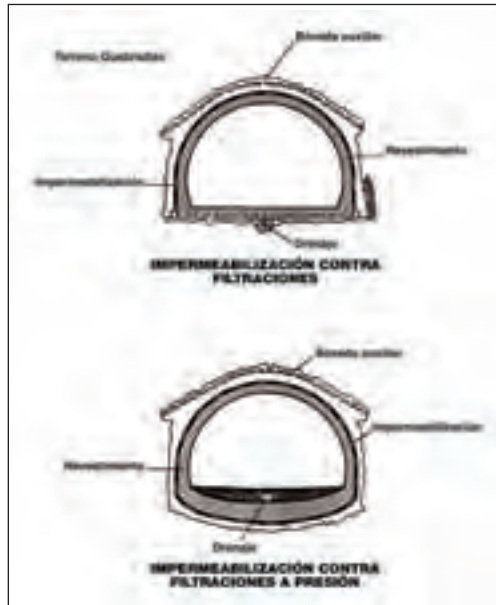


Figura 29.- Detalle para terrenos quebradizos

Como la unión entre las dovelas y la impermeabilización no es suficiente para soportar la presión del agua, es necesario construir un revestimiento interior con hormigón encofrado.

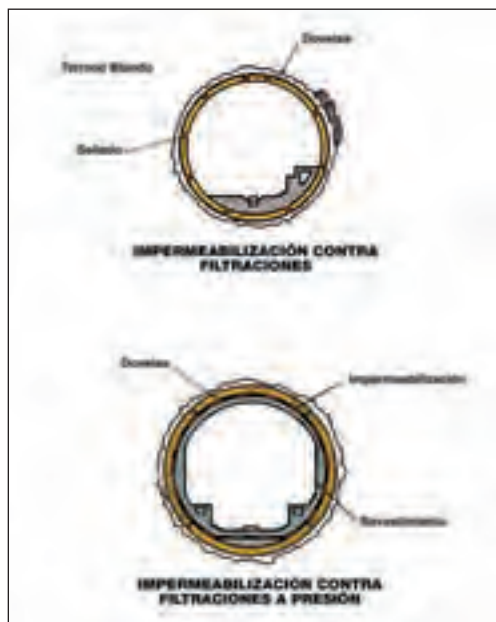


Figura 30.- Detalle en el caso de terrenos blandos

Es importante añadir, que una impermeabilización interior efectuada sobre un soporte de sostenimiento no puede proteger al mismo de las insuficiencias perjudiciales del agua y del terreno, al contrario de lo que ocurre en otros casos, tales como impermeabilizaciones exteriores donde la misma está unida al terreno por la presión que ejerce éste.

Para impermeabilizaciones exteriores es importante el papel que juega el intercambio entre terreno, revestimiento y el procedimiento de construcción.

Definidos los procedimientos de impermeabilización, según la influencia del terreno, es importante resaltar la determinación de consecuencias para la elección del material idóneo de impermeabilización.

Con revestimientos rígidos sólo se necesita un material de flexibilidad muy pequeña. Sin embargo, en revestimientos flexibles (p.e. tubings) sólo se puede utilizar materiales con un alto grado de elasticidad.

7.2 Influencia del agua

Es obvio afirmar que una impermeabilización está influenciada en alto grado por el tipo y la calidad del agua del terreno. En las siguientes tablas se muestran los límites recogidos en la Norma UNE 104424.

Factores	Límites perjudiciales	
	Hormigón (mg/l)	Acero (mg/l)
Sulfatos	> 200	> 300
Nitratos	> 50	> 50
Anhídrido Carbónico	Con cantidades mínimas	
Ácido Sulfúrico	> 1	-
Cloros	-	> 100
Aceites y grasas	-	> 5 a 10
Oxígeno	-	> 4
Magnesio	> 100	-
Fenoles	Muy perjudicial	

Tabla 10.- Límites perjudiciales para la valoración de agresividad de las aguas

Factores	Grado de agresividad		
	Débil	Fuerte	Muy Fuerte
Factor pH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
Anhídrido Carbónico	15 - 30	30 - 60	> 60
Magnesio	100 - 300	300 - 1500	> 1500
Amonios	15 - 30	30 - 60	> 60
Sulfatos	200 - 600	600 - 3000	> 3000
Dureza agua (grados alemanes)	5 - 3	< 3	-

Tabla 11.- Límites perjudiciales de las sustancias en aguas subterráneas

El agua que ha penetrado en el suelo tiende a profundizar progresivamente siguiendo la trayectoria de los poros y fisuras hasta que encuentra un estrato impermeable sobre el cual corre o se estanca. Según sea la posición de dicho estrato, el agua forma una capa hídrica. Cuando esta capa no tiene su superficie superior limitada por un estrato impermeable, sino que este nivel superior es libre, toma el nombre de capa freática.

Pero no todo el agua que se filtra se reúne en esta capa, parte de aquella es retenida por encima del nivel freático y forma una sutil membrana que cierra cada uno de los gránulos del terreno, formando la franja capilar, por debajo de la cual existe una zona de saturación y por encima se encuentra sucesivamente una zona de aireación y una zona de evaporación.

En general podemos distinguir entre túneles situados en zonas de Aguas subterráneas, en zonas de Saturación o en la Franja capilar. La intensidad de agresividad del agua contra el revestimiento dependerá del tipo de agua del terreno y puede manifestarse de dos maneras: agua capilar o agua de capa hídrica.

Según esta división existe una clasificación de las medidas a tomar en cuanto a las técnicas de impermeabilización, así distinguiremos:

Impermeabilización en franja capilar:

- ▲ Pinturas impermeables
- ▲ Escasamente membranas

Impermeabilización en zonas de Saturación:

- ▲ Morteros hidrófugos
- ▲ Membranas

Impermeabilización en Aguas Subterráneas:

- ▲ Membranas
- ▲ Escasamente morteros hidrófugos.

Las diferencias se basan sobre todo, en el modo y en el tipo de impermeabilización en cuanto a los puntos siguientes:

Impermeabilización en franja capilar. Debe ser efectuada en toda construcción subterránea, ya que se deben cerrar los poros para evitar que la humedad llegue al interior según las leyes de los capilares.

Impermeabilización en zonas saturadas. Se debe desviar el agua para que no se forme presión. Generalmente esta agua desviada se recoge en un drenaje longitudinal del túnel.

Impermeabilización en aguas subterráneas. Debe ser una impermeabilización flexible y cerrada, y resistente a la presión del agua subterránea. Durante la construcción es necesario bajar el nivel freático o eliminarla mediante aire comprimido.

De importancia relevante para la elección del material de impermeabilización es la composición química del agua y del terreno, ya que ciertas sustancias sueltas en ambos pueden atacar la impermeabilización o el revestimiento.

Queda claro, que es indispensable investigar la estructura química del suelo y de las aguas subterráneas antes de empezar la construcción de un túnel. Sólo en ese momento, es posible elegir los materiales de construcción e impermeabilizantes para usarlos de manera que puedan cumplir con su misión.

7.3 Influencia del uso del tunel

Las exigencias que se requieren en cuanto al grado de impermeabilización de un túnel dependen esencialmente del tipo de uso del mismo.

Es aconsejable no tener unas exigencias innecesariamente elevadas que no estén en relación con la función del uso del túnel, porque ello tendrá importantes consecuencias, tanto para las especificaciones como para el coste de la obra.

Teniendo en cuenta esto, parece razonable establecer una diferencia según el uso del túnel.

Túneles de ferrocarril. Fuera de las ciudades no tienen que ser completamente estancos, ya que la humedad capilar de las paredes o pequeñas filtraciones no influyen en el tráfico de trenes. Pero es necesario remarcar la necesidad de tener cuidado ante la posibilidad de formación de hielo, deterioro del revestimiento y daños del sistema eléctrico.

Por lo tanto es aconsejable un drenaje exterior (Impermeabilización primaria, intermedia y principal, mínimo).

Túneles de carretera. Requieren un grado de Impermeabilización más alto que los de ferrocarriles. En determinados casos se pueden admitir humedades capilares.

Como generalmente tienen revestimiento interior, es fácil prever un sistema de impermeabilización generalizada (Impermeabilización primaria, intermedia y principal, mínimo).

Túneles canal (Hidráulicos). Tienen que ser completamente impermeables, sobre todo, en cajeros y solera, para evitar tanto la fuga de agua como la entrada exterior (Impermeabilización primaria e intermedia mínimo).

Galerías de acceso e instalaciones hidráulicas. De acuerdo con su finalidad deben de ser completamente impermeables, sobre todo en bóveda, para evitar la condensación y altos grados de humedad que pudiesen arruinar equipos de control. (Impermeabilización primaria y posterior mínimo).

Falta por añadir que el concepto de "Túnel seco" en los distintos países es muy diferente.

- En Hungría, por ejemplo, un túnel es considerado como impermeable y esto independientemente del revestimiento o del sistema de impermeabilización, cuando la entrada de agua (filtraciones) es inferior a 0,3 litros/m² en un plazo de 24 horas.
- En Suecia se establecen tres tipos:
 1. Mínimo 0,05 l/m² en 24 horas.
 2. Mínimo 0,19 l/m² en 24 horas.
 3. Mínimo 1,93 l/m² en 24 horas.
- En Alemania y en Suiza es mucho más estricto, se solicita la estanqueidad total.
- En España se aplica la **Norma UNE 104.424**

Para túneles excavados en roca resulta difícil y costoso obtener un interior seco. Todas estas reflexiones tienen consecuencias importantes en lo referente a la impermeabilización.

En el caso de un túnel, p.e., con una impermeabilización principal mediante láminas plásticas se debe exigir que sea completamente impermeable.

Esto significa que después de dos años, una vez evaporada la humedad propia, el revestimiento debe estar completamente seco. Si aparecen filtraciones de agua se debe a una mala aplicación,

mal diseño o a que el material se ha agrietado.

Los mismos requisitos se deben para impermeabilización rígida mediante morteros hidrófugos, siendo el riesgo mayor en esta última.

Grado Impermeabilidad	Características de Humedad	Utilización de la obra	Filtraciones de agua l/m² en 24 horas
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior	<ul style="list-style-type: none"> - Lugares secos - Locales refrigerados - Presencia continua de personas - Almacenes sensibles a la humedad (papel, alimentos,...) 	0
2	SECO. Permitida la difusión de vapor	<ul style="list-style-type: none"> - Instalaciones militares y locales húmedos (Baños,...) - Locales con instalación de suministro de energía (Subestaciones,...) - Locales Subterráneos de uso general 	0
3	SECO	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenes y Locales Comerciales - Estaciones de Metro 	< 0,001
4	CASI SECO	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de Autopista - Túneles de Montaña - Túneles Ferroviarios de alta velocidad 	< 0,01
5	FILTRACIONES Capilares	<ul style="list-style-type: none"> - Aparcamientos - Túneles de carretera y en roca 	< 0,1
6	LIGERO GOTEÓ de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de Ferrocarril - Líneas de Metro 	< 0,5
7	GOTEÓ de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de Alcantarillado 	< 1,0

Tabla 12.- Parámetros de diseño de impermeabilización (recomendaciones CIRIA)

En resumen y a nuestro juicio, se puede establecer que:

- ▲ Una buena impermeabilización es una necesidad para la explotación y también una importante precaución para proteger el revestimiento y la roca excavada”

7.4 Requisitos para una correcta impermeabilización

Según lo anteriormente descrito para el proceso de impermeabilización, trataremos de reunir a continuación cuales son los requisitos básicos para diseñar una buena impermeabilización:

- Recubrimiento total de las zonas a proteger
- Debe estar entre dos partes firmes de la construcción (excepto en membranas sintéticas usadas con impermeabilizantes exteriores)
- Hacer puente entre fisuras sin que haya destrucción (elasticidad)
- Quedar bien fijo el soporte para evitar desplazamientos antes de construir el revestimiento
- Resistencia a las aguas agresivas, variaciones de temperatura y previsión del agua
- Resistencia al envejecimiento y microorganismos
- Elección minuciosa para su aplicación sobre el soporte teniendo en cuenta su humedad y que no resulte dañino para la salud, tanto del material como del procedimiento a unos costes razonables

7.5 Soporte para la impermeabilización

Para el estudio completo de una impermeabilización, además de los requisitos anteriormente citados, se necesita preparar un soporte donde vaya fijada la impermeabilización. Los puntos más importantes para este soporte serían:

- El soporte deberá ser resistente, estar libre de partículas, no tener huecos ni fisuras, crestas o salientes, ya que la impermeabilización no está capacitada para superar estas irregularidades.
- Si hay zonas del soporte con peligro elevado para la impermeabilización (aristas, esquinas etc.) es aconsejable redondearlas.

Las recomendaciones en cuanto a la corrección de irregularidades y su dimensionamiento se reflejan en el croquis adjunto.

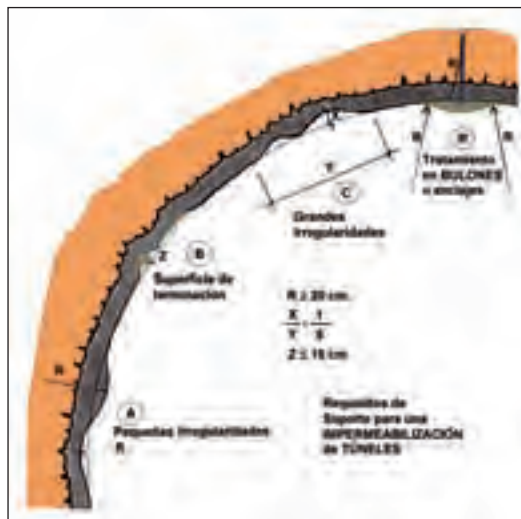


Figura 31.- Requisitos del soporte para una correcta impermeabilización

7.6 Sistemas de impermeabilización

Según las influencias, requisitos y soportes ya descritos, los trabajos de impermeabilización constarán de varias fases que son las siguientes:

- ▲ Impermeabilización Primaria
- ▲ Impermeabilización Intermedia
- ▲ Impermeabilización Principal
 - Sistema Sika Anchor
- ▲ Impermeabilización Posterior

Según las filtraciones existentes y el tipo de revestimiento previsto para el túnel, la impermeabilización puede comprender desde una hasta cuatro de las fases expresadas sucesivamente y en el orden indicado.

La definición de cada una de estas cuatro fases es la siguiente:

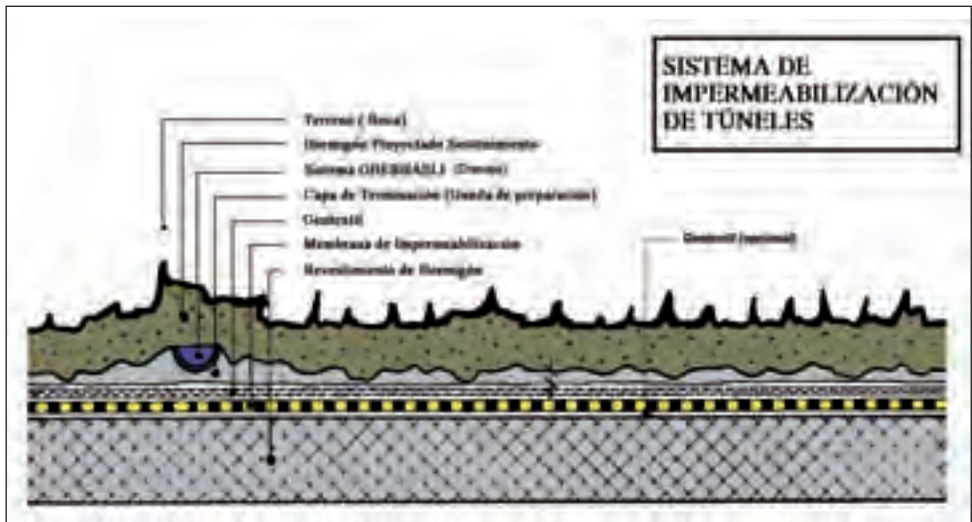


Figura 32.- Esquema del sistema de impermeabilización de túneles con PVC

7.6.1 Impermeabilización primaria

Son los trabajos provisionales de taponamiento o de recogida y conducción de aguas que permiten la ejecución posterior, en su caso, de las siguientes impermeabilizaciones; la Intermedia y la Principal.

Fundamentalmente consiste en el taponamiento de filtraciones localizadas, con cemento amasado con hidrófugo líquido de fraguado ultra-rápido (**SIKA 4A**), completado con tratamientos superficiales. En el caso de filtraciones difusas el tratamiento será similar pero con hidrófugo de fraguado rápido y resistente a las aguas agresivas.

El trabajo se completa con la formación de drenes superficiales, permanentes, en forma de espina de pez, empleando medias cañas, tuberías, etc., para la captación de agua y su conducción a las cunetas.

Relación de métodos actuales de Impermeabilización Primaria:

- Procedimiento OBERHASLI
- Procedimiento OBERHASLI mecánico
- Impermeabilización con medias cañas
- Impermeabilización con tuberías plásticas
- Hormigón proyectado

El método **OBERHASLI** es el más aplicado y requiere una mano de obra especializada, ya que su aplicación es manual y muy técnica. Para detalles en cuanto al dimensionamiento y formación de drenaje, ver croquis adjuntos.

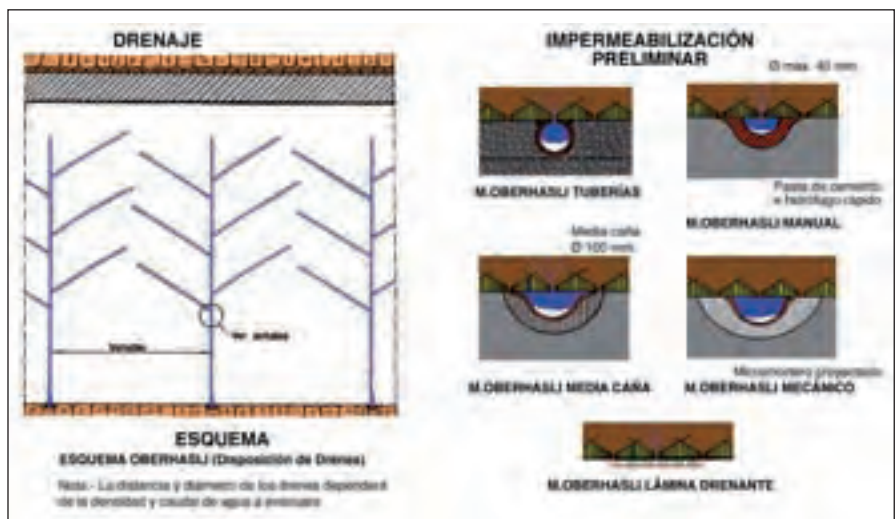


Figura 33.- Detalles del sistema Oberhasli

Este procedimiento consiste en:

- Limpieza con agua a presión del soporte, para eliminar los restos adheridos a las paredes del túnel.
- Realización de los drenes, mediante pasta de cemento y SIKA 4a, y media caña, tubería o manguera según se decida con la adopción del diámetro apropiado de acuerdo con los caudales de agua.
- La densidad del drenaje será baja, media o alta, dependiendo de la distancia del dren principal. Se aconseja realizar el tratamiento sistemáticamente en la longitud del túnel con filtraciones.
- Esta Impermeabilización se deberá proteger inmediatamente mediante la fase siguiente a base de hormigón proyectado (Impermeabilización Intermedia) para evitar el deterioro y fallo de funcionamiento de los drenajes, al utilizar acelerantes de fraguado.
- También se tendrán en cuenta las conexiones a los drenes longitudinales del túnel para recoger el agua y dirigirla a las cunetas del túnel.

7.6.2 Impermeabilización intermedia

Son los trabajos posteriores a la impermeabilización primaria mediante la aplicación de hormigón proyectado o morteros. La impermeabilización intermedia puede ser de protección o de regularización.

Protección: Es la aplicación de una hormigón o mortero proyectado armado de un espesor no superior a 7 cm en toda la superficie a tratar, así se consigue una protección del sistema primario elegido, ya que de no efectuarlo, y debido a los acelerantes de fraguado empleados, los drenes, taponamientos e impermeabilización quedarían fisurados y fallarían con el tiempo.

Regularización: La finalidad de este método a base de hormigón proyectado o morteros preparados es servir de soporte a una Impermeabilización Principal y su espesor suele oscilar entre 7 y 25 cm.

También cumple la finalidad de sostener provisionalmente la excavación del túnel o galería.

7.6.3 Impermeabilización principal

Es la ejecución de una membrana impermeable de cualquier tipo que garantice la absoluta estanqueidad de la galería o túnel.

Hay diferentes tipos de ejecución:

- Revoque o gunita.
- Revestimiento con morteros predosificados
- Revestimiento con láminas plásticas (**Sikaplan WP 1100-15HL** o **Sikaplan WP 1100-20HL**)

Estos revestimientos se aplican sobre todo el perímetro del túnel o en parte de la bóveda. La elección del tipo de membrana vendrá indicada por la naturaleza del terreno, el caudal del agua y por el tipo de hormigón estructural.

La experiencia durante más de 100 años de **Sika** en la impermeabilización de túneles y obras subterráneas, ha dado como resultado un procedimiento para Impermeabilizaciones Principales basados en las láminas de PVC-P **SIKAPLAN**, para túneles a cielo abierto, galerías de presión y túneles excavados por el sistema NATM.



Foto 18.- Lámina de PVC colocada en un túnel y detalle del anclaje de la lámina

Este procedimiento consiste en:

- Colocación de una capa drenante sobre el soporte excavado una vez regularizado, mediante un Geotextil de polipropileno de gramajes comprendidos entre 300 - 500 g/m², sujetos mediante botones especiales, de PVC (**Arandelas Sika**)
- Colocación de geomembrana de PVC-P **SIKAPLAN**, de espesor apropiado según características determinadas, en anchos prefabricados de 2,5 m, con andamios mecanizados.
- Soldadura en solapes utilizando la técnica de soldadura termoplástica, con doble soldadura y canal central para control.
- Se analiza la tensión y la fuerza mecánica de la doble soldadura creada de esta manera, y se comprueba que aguanta aproximadamente una presión de 2 bares durante un periodo de 15 minutos y con una pérdida de presión que no supere el 10% según la Norma 104481-3-2.

A continuación, se muestra un esquema de la instalación de control.

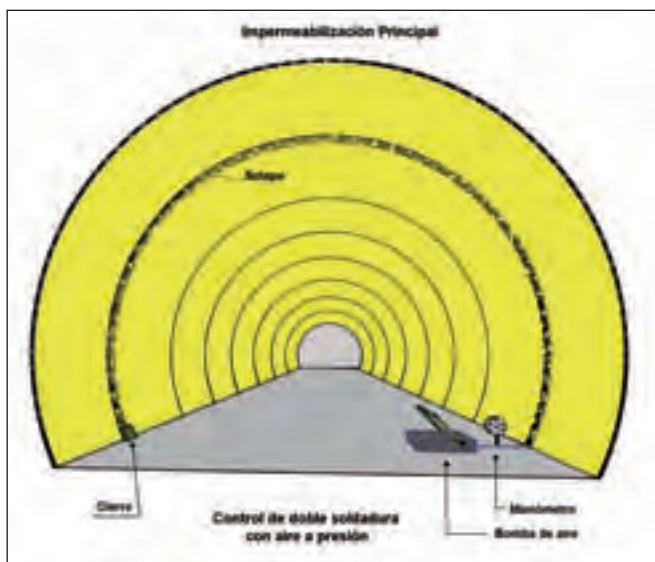


Figura 34.- Esquema de control de presión de una soldadura doble con canal

- Remates de encuentro con drenaje longitudinal y en boquillas, mediante pletinas metálicas, selladas con Sikaflex.

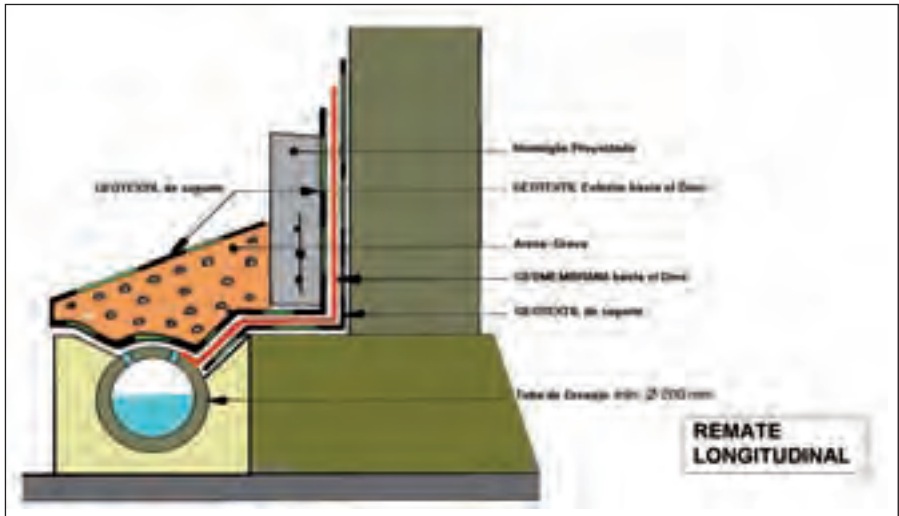


Figura 35.- Detalle de un remate longitudinal

De acuerdo a la Norma UNE 104242, se diferencian entre láminas Tipo A (lámina armada con hilo sintético) y láminas Tipo B (lámina homogénea sin armar), diferenciando en función del tipo de tajo:

- Construcción de túneles con superficies lisas - Tipo A o Tipo B
- Construcción de túneles con avance convencional (explosivos) o con máquina excavadora a sección parcial - Tipo B
- Construcción de túneles a cielo abierto - Tipo A o Tipo B
- Emboquilles y puntos singulares - Tipo A

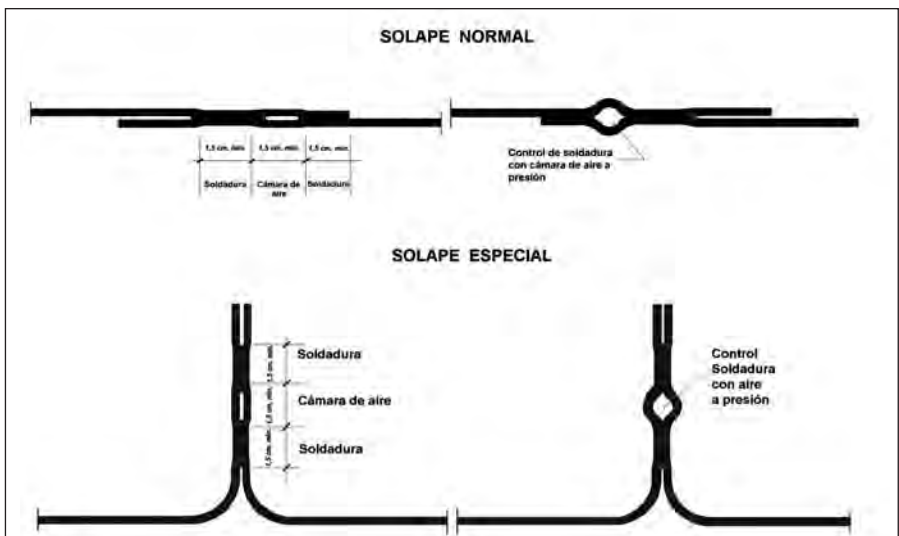


Figura 36.- Detalle de un solape normal y un solape especial de lámina PVC-P

Las características técnicas de las geomembranas de PVC-P **SIKAPLAN** cumplen la Norma SIA 280 y la Norma UNE 104.424.

Los detalles de los sistemas adheridos, fijados, a cielo abierto, galerías de presión, solapes y control se muestran en los croquis adjuntos.

7.6.3.1 Sistema Sika Anchor

El procedimiento de Impermeabilización Principal a base de Láminas **SIKAPLAN**, también llamado Sistema Sika Anchor, se emplea en túneles sin un revestimiento posterior de hormigón encofrado. Consiste en:

Soporte: Hormigón proyectado de sostenimiento o Impermeabilización Intermedia de protección de los drenajes.

Fases de ejecución:

- 1) Colocación de geotextil según soporte
 - ▲ Granulometría del hormigón proyectado de soporte
 - 0-4 Geotextil 300 g/m²
 - 0-8 Geotextil 400 g/m²
 - 0-16 Geotextil 500 g/m² mínimo
- 2) Colocación de lámina **SIKAPLAN PVC - SARNAFIL**

La membrana se coloca mediante **Arandelas SIKA** con una densidad mínima de 1 Ud/m².
- 3) Colocación de bulones de anclaje de diámetro 16 - 20 mm y 0.6 m de profundidad (0,5 anclaje en soporte + 0,1 para colocación de malla) en cuadrículas de 1 m.

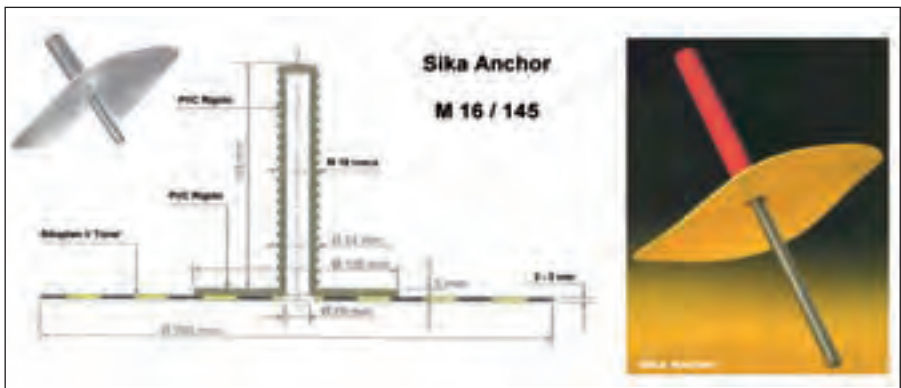
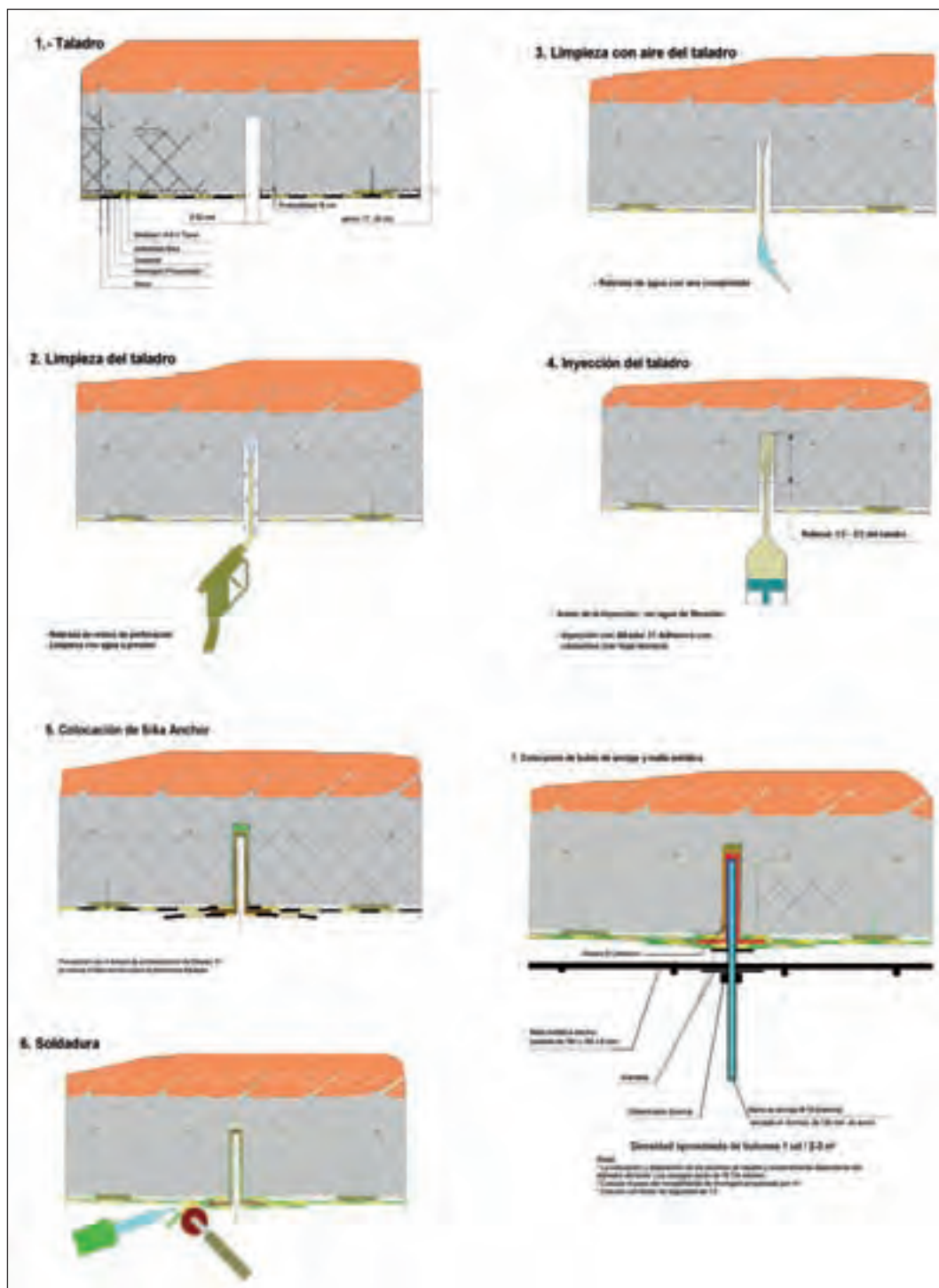


Figura 37.- Detalle del sistema Sika Anchor

- 4) Colocación de **SIKA ANCHOR** en cada bulón, incluyendo soldadura termoplástica y sellado con **SIKAFLEX 11 FC**, con arandelas de cremallera.
- 5) Colocación de separadores metálicos tipo araña en cada bulón.
- 6) Colocación de malla metálica electrosoldada de 100 x 100 x 6 mm.
- 7) Aplicación de un hormigón proyectado de 10 cm de espesor y granulometría 0-12 mm.



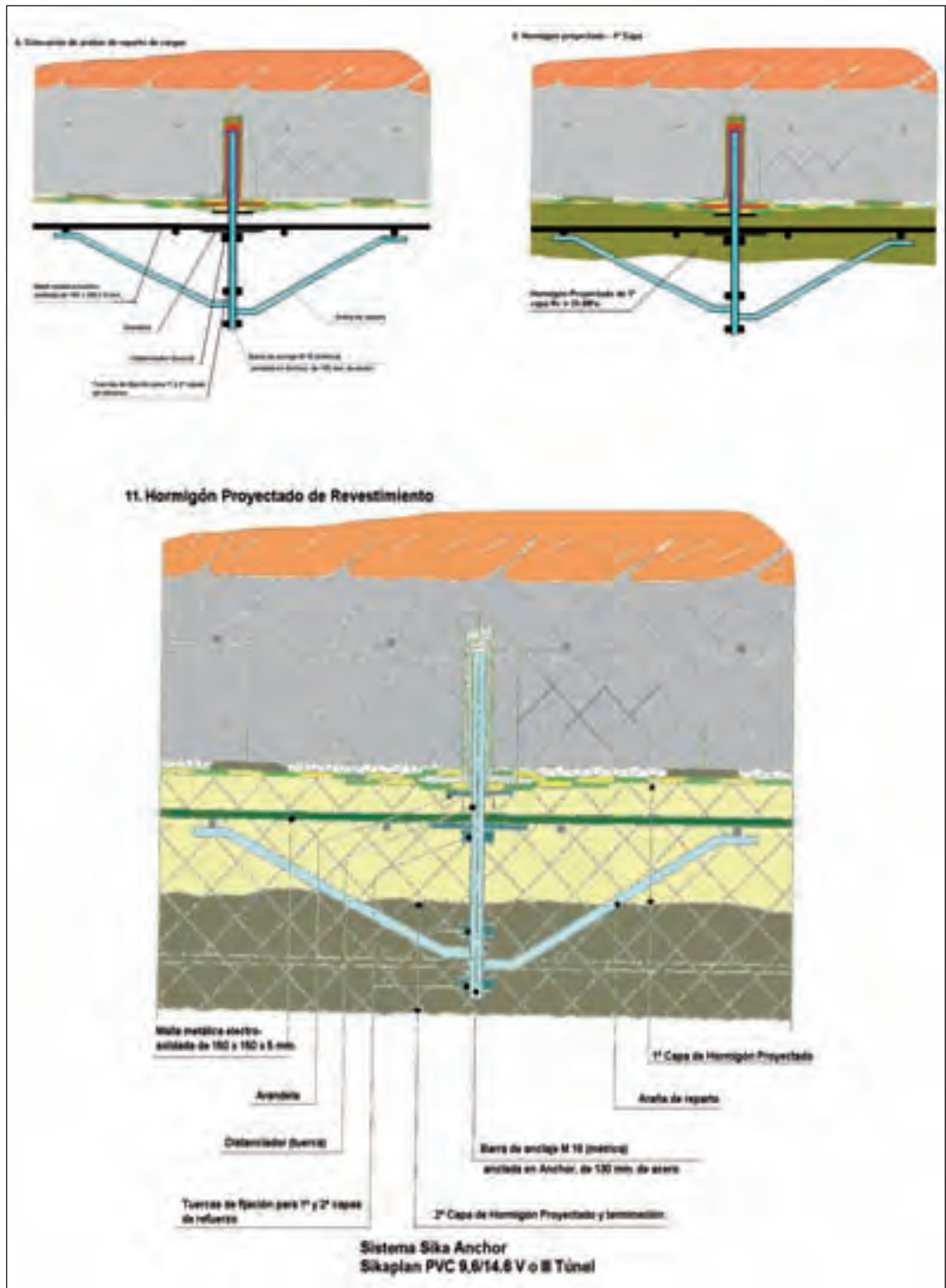


Figura 39.- Secuencia de preparación del sistema Sika Anchor (2)



Foto 19.- Detalle de la secuencia de colocación en fotografías

7.6.4 Impermeabilización posterior

Se incluyen en este capítulo aquellos trabajos previstos o no, complementarios de la impermeabilización principal, o bien trabajos de reparación que conduzcan posteriormente a la estanqueidad de la construcción.

Estos trabajos pueden consistir en:

- Inyecciones
- Morteros Predosificados Impermeables
- Revoques o gunita
- Taponamiento y sellado de grietas
- Rejuntado de mampostería
- Drenajes
- Juntas

Su aplicación se definirá según la importancia de las filtraciones o la calidad del soporte de ejecución.

7.7 Nuevo sistema Oberhasli Sika

La impermeabilización posterior de túneles y galerías existentes es un campo complejo de la ingeniería civil, debido a los costes de mantenimiento y a las exigencias de circulación. La impermeabilización de túneles y galerías tiene un gran interés tanto técnica como económicamente. Contribuye a la calidad y durabilidad de las obras. Es importante la elección y distribución correcta de los materiales con respecto a las condiciones de un determinado lugar de acuerdo con las consideraciones del tránsito.

Es necesario tener en cuenta los factores siguientes:

- Condiciones del terreno y tipo de construcción
- Condiciones del agua y en qué estado se encuentra
- Grado de impermeabilización requerido según el uso del túnel
- Elementos necesarios y específicos del sistema de impermeabilización
- Acciones a las que puede estar expuesta la impermeabilización

7.7.1 Objeto y campo de aplicación

Este documento tiene como objeto definir las exigencias para la puesta en obra del sistema de impermeabilización posterior de túneles y galerías **NUEVO SISTEMA OBERHASLI** de **Sika**, con medias cañas y hormigón proyectado, abarcando los materiales, equipos, características mecánicas, operaciones preliminares, técnicas de aplicación y control de calidad.

Las técnicas y procedimientos descritos están basados en años de experiencia. Sin embargo, los procedimientos de aplicación pueden variar de una zona a otra, siendo necesario realizar ajustes en ellos para ceñirse a las necesidades reales de cada obra.

Los campos de aplicación comprenden los túneles de carretera y ferroviarios, así como las galerías hidráulicas y cavernas, y en general, las obras subterráneas.

A. Túneles con revestimiento estructural mediante mampostería. Generalmente son túneles antiguos para ferrocarril, realizados sin sistema de impermeabilización y que presentan problemas de gálibo.

En este caso la impermeabilización la integran un drenaje sistemático, alojado en rozas perimetrales, con recogida de aguas de filtración en la cuneta longitudinal y un revestimiento, como mínimo en bóveda, a base de hormigón proyectado impermeable de 4 cm de espesor mínimo.

B. Túneles con revestimiento estructural de hormigón. La mayoría de los túneles con revestimiento estructural de hormigón encofrado o proyectado, carece de un sistema de impermeabilización apropiado, según los métodos subterráneos de trabajo usuales (Escasamente presentan un sistema de recogida de filtraciones puntuales o membranas temporales clavadas en el soporte).

En este caso la impermeabilización la integran un drenaje sistemático sobre el soporte con recogida de aguas de filtración en la cuneta longitudinal y un revestimiento, como mínimo en bóveda, a base de hormigón proyectado impermeable de 4 cm de espesor mínimo.

C. Túneles con sostenimiento por dovelas o segmentos. Un campo importante de la impermeabilización de túneles son los construidos con segmentos o dovelas, es decir, elementos prefabricados en hormigón armado.

En este caso la impermeabilización la integran un drenaje sistemático sobre el soporte con recogida de aguas de filtración en la cuneta longitudinal y un revestimiento, a base de hormigón proyectado impermeable de 4 cm de espesor mínimo.

D. Aplicaciones especiales. Las galerías de presión o de desagüe hidráulicas, son impermeabilizadas del mismo modo, contra las aguas de filtración en roca contra una presión interior, y no contra la presión hidrostática exterior, y sobre todo, en los casos de pérdida de agua de explotación.

Otra aplicación especial se refiere a los pozos de ventilación frecuentes en los túneles de carretera, así como a los nichos, donde las deformaciones posibles son particularmente grandes.

7.7.2 Normas para consulta

- UNE 80-300 - Cementos. Recomendaciones para el uso de los cementos
- UNE 83.600/94 - H y M Proyectado. Clasificación y definiciones
- UNE 83.601 - Determinación del tiempo de fraguado
- UNE 83.602/91 - Realización de muestras, curado y conservación
- UNE 83.603/94 - Determinación de la resistencia a compresión "in situ" por medio de penetrómetro

- UNE 83.604/94 - Determinación de la resistencia a compresión “in situ”. Ensayo de arrancamiento
- UNE 83.605/91 - Corte y Rotura de muestras
- UNE 83.606/91 - Ensayo a flexotracción de probetas
- UNE 83.607/94 - Recomendaciones de uso.
- UNE 83.608/94 - Determinación de rechazo
- UNE 83.609/94 - Determinación de la resistencia a compresión “in situ”. Ensayo de penetración extracción
- UNE 83.610 - Determinación del contenido de fibras Consideraciones generales

Es muy importante a la hora de diseñar y definir el tipo de impermeabilización en túneles y en galerías, asegurar la estanqueidad y su durabilidad, ya que:

- La penetración de agua por las fisuras del revestimiento estructural, tanto de hormigón, como de mampostería, amenaza el comportamiento de los revestimientos y las instalaciones mecánicas, por el efecto del hielo tanto en las boquillas como en los túneles cortos.
- El agua de filtración conduce en invierno a la formación de hielo en la calzada, con el consiguiente peligro para la circulación de vehículos.
- El agua de filtración da lugar a eflorescencias y concreciones calcáreas sobre la superficie interior del revestimiento, con la consiguiente lixiviación del hormigón o la destrucción de la mampostería.

Los túneles insuficientemente impermeabilizados necesitan una importante inversión en mantenimiento, debido a la formación de hielo, la lixiviación y los desperfectos, tanto de las instalaciones mecánicas, como de las paredes de hormigón del túnel.

El diseño de la impermeabilización de un túnel tiene que tener en cuenta los drenajes y su protección. El drenaje asegura la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes o cunetas longitudinales.

Dichos drenes deberán tener el diámetro suficiente (> 20 cm) y sus aberturas de entrada proporcionales al agua de filtración esperada.

7.7.3 Requisitos de la impermeabilización de un túnel

La impermeabilización de un túnel comprenderá:

Drenaje: Dependiendo de los caudales de filtración, se efectuará una impermeabilización primaria a base de drenes con Media Caña para recoger y conducir las aportaciones de agua a los drenes o cunetas longitudinales.

Este sistema se efectuará sistemáticamente, dependiendo de las zonas de mayor filtración, o de forma puntual. La misión de los drenes es, además de recoger el agua, presentar soportes adecuados para la aplicación del hormigón proyectado polimérico impermeable posterior.

Los sistemas de impermeabilización primaria (drenaje) más usuales en el Nuevo Sistema Oberhasli son:

- Media Caña de material plástico, adosada al contorno o perímetro, en forma generalmente de espigas de pez. Se pueden proteger en su colocación mediante pasta de cemento con acelerante ultrarrápido Sika 4a, capaces de fraguar en presencia de agua.
- Media Caña de material plástico, colocada en roza perimetral de dimensiones apropiadas al caudal, selladas en bordes con Sikaswell S.
- Dren autoformado mediante hormigón proyectado impermeable sobre mangueras retiradas o Medias Cañas, para la formación del dren.

El acceso a los conductos de drenaje en su parte inferior (altura en hastial $> 0,80$ m) debe figurar en el Proyecto con el fin de permitir los controles posteriores de mantenimiento del túnel.

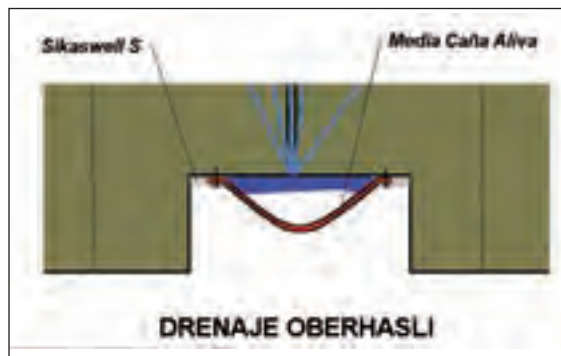


Figura 40.- Detalle de una media caña con Sikaswell S alojada en un cajero

Impermeabilización: Se efectuará en toda la superficie a tratar un tratamiento impermeable a base de hormigón proyectado polimérico, de 4 cm de espesor mínimo, previa limpieza de soporte existente, teniendo en cuenta los siguientes requisitos:

Requisitos del soporte:

No existirán irregularidades con un radio inferior a 20 cm. Se efectuará una limpieza con agua a alta presión (> 200 atm) suficiente para presentar un soporte exento de partículas sueltas, restos de aceites, grasas, etc.

Los elementos de anclaje y bulonado que sobresalgan del soporte se cortarán en su parte no funcional, tratándose las irregularidades según lo descrito anteriormente.

Requisitos de la impermeabilización principal:

La impermeabilización con hormigón proyectado polimérico debe proteger y envolver la superficie de la obra a tratar, de manera durable contra el agua de filtración. La impermeabilización se debe adaptar sin problemas a las irregularidades del soporte, preparado según los requisitos anteriores y tener una adherencia al soporte superior a 1N/mm^2 . Su resistencia a compresión será superior a 35 MPa.

La impermeabilización con hormigón proyectado polimérico debe ser puesta en obra de manera sencilla, racional y económica, sin interrumpir el desarrollo de los trabajos posteriores, e independientemente de que el soporte esté húmedo.

7.7.4 SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN – MATERIALES

Un sistema de Impermeabilización es el conjunto de capas, caracterizado por la naturaleza, número, forma de colocación y dimensionado de cada una de ellas.

El sistema está constituido por todos o algunos de los elementos indicados en la figura. La calidad de los materiales a utilizar, el lugar y condiciones de trabajo, y por último el equipo empleado, influyen en la calidad final de la impermeabilización.

Figura 41.- Esquema del Nuevo Sistema Oberhasli

Los materiales básicos a utilizar son: Masilla para sellado de juntas entre la Media Caña y el cajero (**SikaSwell S-2**), aditivos acelerantes de fraguado (**Sigunita 49 AF** o **Sigunita L-53 AFS**) dependiendo de la aplicación.

Como productos complementarios o auxiliares se pueden considerar las adiciones a base de humo de sílice (**Sikafume S-92 D**), los aditivos reductores del rebote (Sikatell 200) y el acelerante ultrarápido (**Sika 4a**).

Para obtener una estanqueidad total de la obra civil deberá complementarse con un sistema de impermeabilización principal mediante hormigón proyectado polimérico o membranas **Sikaplan** a base de PVC-P.

En su utilización en impermeabilización de túneles se deberá tener en cuenta, las conexiones a los drenes longitudinales del mismo para recoger el agua y dirigirla a las cunetas del túnel.

La Media Caña puede doblarse en cualquier dirección, y se cortará con un cuchillo o unos alicates según la longitud del dren que se desee.

La masilla **SikaSwell S-2** para el sellado de juntas de hormigonado, que expande en contacto con el agua, impidiendo eficazmente el paso de la misma por la junta.

Empleando diferentes secciones triangulares de masilla, la cantidad de metros lineales ejecutables con un unipac de 600 cm³ se recoge en la tabla que se muestra a continuación.

Corte de la boquilla (mm)	Sección (mm ²)	Metros de sellado Teóricos (m)	Metros de sellado Reales ⁽¹⁾ (m)
10x10x10	43	13'95	11'16
13x13x13	73	8'22	6'58
15x15x15	98	6'12	4'90
17x17x17	125	4'80	3'84
20x20x20	173	3'47	2'77

Tabla 13.- Rendimiento de Sika Swell S-2

⁽¹⁾ Por considerar la superficie del hormigón irregular y una extrusión no uniforme, la longitud real de sellado se ha considerado un 20 % inferior a la teórica

Espesor de hormigón (cm)	Núm. de cordones	Lado de la sección triangular (mm)
10 – 30	1	15
30 – 50	1	20
> 50	2	20

Tabla 14.- Número de cordones en función del espesor de hormigón

En líneas generales se recomienda un cordón de sección triangular de

15 mm de lado cuando el diámetro máximo del árido del hormigón es < 25 mm, y un lado de 20 mm en la sección triangular cuando el tamaño máximo del árido es > 25 mm. Se pueden emplear secciones mayores o más pequeñas dependiendo de las condiciones de trabajo y las propiedades de la estructura.

Si el nivel del agua sube de repente, la expansión de **SikaSwell S-2** no es instantánea, necesita tiempo para expandir. Contiene isocianatos. Evitar el contacto con la piel y ojos. En caso de contacto lavar inmediatamente con abundante agua limpia. Para una óptima aplicación en tiempo frío, mantener los envases 8 horas a 20°C.

La aditivo acelerante de fraguado mineral **Sigunita 49 AF**, se presenta en polvo, y está exento de productos alcalinos. Este producto está especialmente indicado para morteros y hormigones proyectados por vía seca.

Dado que no contiene álcalis se trata de un producto de fácil manipulación y libre de toxicidad. Permite la aplicación de espesores importantes de hormigón proyectado, reduciendo el rebote de proyección, aumentando las resistencias iniciales, y sin influir en la bajada de resistencias finales a 28 días, lo que posibilita reducciones significativas en las cantidades de cemento a utilizar.

El aditivo acelerante de fraguado en estado líquido **Sigunita L 53 AFS**, está exento de productos alcalinos, y se recomienda su uso en todo tipo de trabajos de morteros y hormigones proyectados.

Es un producto de la última tecnología química de los aditivos acelerantes, no contiene álcali lo que le hace un producto de fácil manipulación y libre de toxicidad.

Permite la aplicación de espesores importantes de hormigón proyectado, reduciendo el rebote de proyección, aumentando las resistencias iniciales, y sin influir en la bajada de resistencias finales a 28 días, lo que posibilita reducciones significativas en las cantidades de cemento a utilizar.

La adición a base de humo de sílice **Sikafume S-92 D**, especialmente indicada para hormigones proyectados y bombeados.

Con la utilización de esta adición se aumenta de una manera importante la cohesión del hormigón fresco, mejorando al mismo tiempo las resistencias mecánicas a largo plazo, y reduciendo considerablemente en el hormigón proyectado el rechazo.

El producto **Sika 4a** Impermeabilizante de fraguado rápido, está especialmente indicado para la obturación de vías de agua, drenaje y taponamientos.

Se debe mezclar solamente con cemento Portland fresco para obtener una pasta suficientemente tixotrópica. Se recomienda preparar cantidades de mortero pequeñas que se puedan colocar de una vez y rápidamente.

El Sikatell 200 como aditivo líquido que actúa como medio de cohesión adhesivo y como reductor del rebote en trabajos de hormigón proyectado

Con la utilización de este aditivo se obtienen hormigones proyectados de elevada calidad, altas resistencias y densidades, reduciéndose el rebote de proyección hasta niveles mínimos.

7.7.5 Aplicación del sistema

La aplicación de la impermeabilización será efectuada por personal especializado en cada una de sus fases.

Fase I. Tratamiento de drenaje - Fases de ejecución

1. Preparación de superficies: Se deberán eliminar partículas mal adheridas o sueltas y se deberá limpiar con agua a alta presión (> 200 atm.) la superficie a tratar.
2. Drenes: La geometría de “las espigas de pez” vendrá determinada por las filtraciones de agua. Pero principalmente se recomienda realizar drenes principales con una frecuencia de:

Filtraciones altas: 2 m

Filtraciones medias: 3 m

Filtraciones bajas: 5 m

La disposición de los drenes principales en el túnel será transversal desde bóveda a solera y a los mismos, se irán conectando ramales inclinados, si fuera necesario, con la frecuencia de las aportaciones de agua.

Todos los drenes, dependiendo del gálibo resultante del espesor de la impermeabilización (mínimo 4 cm de espesor), y de la geometría del túnel podrán ir alojados en rozas en el revestimiento de dimensiones proporcionales al tamaño de las Medias Cañas.

A título de ejemplo, el dren puede formarlo una media caña de 84 mm de ancho, de manera que se pueda adaptar a las irregularidades del soporte, para alojamiento del dren en el revestimiento la roza resultante mínima será de dimensiones 100 mm de ancho x 100 mm de profundidad.

Una vez colocada sobre la configuración del terreno o en roza se irá sujetando:

- a) Mediante pasta de cemento y acelerante rápido, en ambos bordes o en su totalidad
- b) Mediante anclajes especiales en ambos bordes cada 15 cm
- c) Mediante grapas en ambos bordes, al tresbolillo

En el caso (a) el acelerante **Sika 4a** debe emplearse solamente con cemento Portland fresco. Verter el producto en un recipiente limpio, añadir el cemento y mezclar durante unos segundos.

En los casos (b) y (c), se sellarán los bordes de la Media Caña con **SikaSwell S-2**, siempre que la misma vaya alojada en cajero.

El conjunto de drenes, ya sean sistemático o no, propiciará una eliminación de filtraciones, recogiendo las aguas de filtración a través de los drenajes y llevándolas a las cunetas.

Es importante añadir que la finalidad de realizar una sistematización de drenajes es recoger toda filtración presente o futura, y, en líneas generales, dejar vías de recogida para obligar al agua a dirigirse a las cunetas longitudinales.

Fase II. Tratamiento de impermeabilización

Ejecución de hormigón proyectado-dosificaciones: En las dosificaciones del hormigón proyectado se tendrá en cuenta lo siguiente:

La curva resultante de la mezcla de los áridos deberá encajar en el huso correspondiente de la Norma UNE 83.607/94.

En el hormigón proyectado por **vía seca** se dosificará la cantidad correspondiente de cemento por m³ (normalmente entre 375 y 400 kg) por cada 1.000 l de áridos, para lo cual, habrá que tener en cuenta la densidad aparente de los áridos.

Se deberá evitar que las humedades de los áridos sean superiores al 2%, ya que ello influirá en la manejabilidad de dicha gunita.

En el hormigón proyectado por **vía semihúmeda** habrá que dosificar la cantidad correspondiente de cemento de forma similar a la vía seca.

En la vía semihúmeda se trabaja con áridos con una humedad comprendida entre el 2 y el 8%, por lo que se recomienda utilizar estabilizadores que controlen el inicio de fraguado hasta 6 horas, y trabajar con arenas que tengan la menor cantidad de finos posibles, siendo las arenas lavadas las óptimas para este tipo de trabajos.

Se podrá añadir agua en la mezcla de áridos hasta conseguir la humedad necesaria de forma controlada, influyendo así en la manejabilidad de dicha gunita.

Finalmente, en el caso de optar por el empleo de un hormigón proyectado por vía húmeda (aplicable a estas reparaciones en función de los equipos disponibles, espacio, volumen, etc) serían aplicables todas las recomendaciones del Capítulo 3 de este libro.

Adiciones opcionales: Sikafume S-92 D y Sikatell 200: Adiciones en polvo y líquido respectivamente, que aumentan la trabajabilidad, la durabilidad y las resistencias iniciales y finales, a la vez que disminuyen el rebote de proyección y la permeabilidad del hormigón.

En cualquier caso, es necesario realizar un estudio serio previamente antes de comenzar cada obra, analizando todos los factores que intervienen en el hormigón proyectado, con el fin de conseguir optimizar dicho hormigón de acuerdo con las exigencias del Pliego de Condiciones de la Obra.

- **Aditivos acelerantes de fraguado:**

Polvo:	Sigunita 49 AF (4%)
Líquidos:	Sigunita L-53 AFS (4%)

- **Adiciones opcionales:**

Humo de sílice:	Sikafume S92D (polvo) (15 kg)
Reductor de rebote:	Sikatell 200 (1%)

Tabla 15.- Acelerantes de fraguado y adiciones para hormigón proyectado

Fase III. Mezclado

Para el correcto funcionamiento de los aditivos y adiciones es fundamental que exista una perfecta mezcla entre todos los componentes del hormigón proyectado, tanto en el hormigón proyectado por vía seca como por vía húmeda.

En ambos casos, se recomienda que la planta de hormigón a utilizar disponga de amasadora, en la cual se pueda conseguir una perfecta mezcla de los áridos, el cemento, y aditivos y adiciones, siendo especialmente recomendable en el caso de empleo de adición de fibras metálicas por la dificultad que entraña su perfecta mezcla en el hormigón.

La disponibilidad de amasadora en la planta de hormigón en muchos casos no es fácil, ante lo cual por lo menos, se deberá asegurar un amasado completo de la mezcla en el camión hormigonera.

Fase IV. Transporte

El transporte de la mezcla de hormigón hasta la obra se realiza normalmente con camiones hormigonera. Será necesario prever antes del comienzo de la obra la estimación del tiempo de transporte con el fin de analizar la necesidad o no de utilizar aditivos estabilizadores de fraguado que nos permitan disponer de una mezcla en buenas condiciones en el momento de su proyección.

Fase V. Protección

Maquinaria. Los equipos de gunitado disponen hoy en día de los procedimientos más avanzados y estudiados, y se complementan con modelos autónomos que disponen de todos los servicios complementarios para el hormigón proyectado como aire, energía eléctrica, bombas de agua, dosificadores, cintas transportadoras, carro móvil y brazos robot hidráulico, lo cual permite una movilidad fácil para el desarrollo de cualquier trabajo.

En toda obra se deberá intentar disponer, si las condiciones de la misma lo permiten, de un robot de proyección con el que se conseguirá una mejor calidad final del gunitado.

El tipo de máquina empleado en la práctica dependerá del tipo de gunita que se requiera, pero casi todas las máquinas permiten que se adapte en alguna medida su producción. Las propiedades de la gunita pueden modificarse cambiando la salida acoplada al rotor, el tamaño de la manguera ó el diámetro de la boquilla o pistola.

En general, se recomendará si es posible, la proyección automatizada por medio de brazos robot hidráulico. Con su utilización se mejorará la calidad del hormigón, se disminuirán los porcentajes de rebote, se mejorarán en gran medida las condiciones de trabajo y la seguridad del mismo, además de obtenerse unas dispersiones menores en los resultados de resistencias de dicho hormigón.

En cualquier caso, independientemente del sistema de proyección escogido, la máquina de proyección deberá asegurar un transporte continuo del hormigón con el fin de conseguir una colocación uniforme del mismo, descartándose así las máquinas enfoscadoras con reducidas velocidades de proyección.

Las máquinas de hormigón proyectado por vía seca/semihúmeda de **flujo diluido**, más conocidas como gunitadoras, disponen de un tambor ó rotor perforado con una serie de cilindros, a través de los cuales baja la gunita procedente de la tolva de alimentación de la máquina.

En la parte inferior del rotor, la gunita entra en la tubería de transporte, en la cual se le añade el aire comprimido que empuja al hormigón en seco hasta la boquilla de salida, adicionándose el agua en la misma boquilla (vía seca) ó a 4-5 m de la misma (vía semihúmeda).

Fase VI. Encuentros y remates longitudinales

El sistema de impermeabilización comprenderá, tanto los encuentros con las boquillas, los finales parciales de la impermeabilización así como el remate en cunetas o drenajes longitudinales, para ello, se tendrá en cuenta la disposición de capas, las dimensiones mínimas del drenaje y el revestimiento.

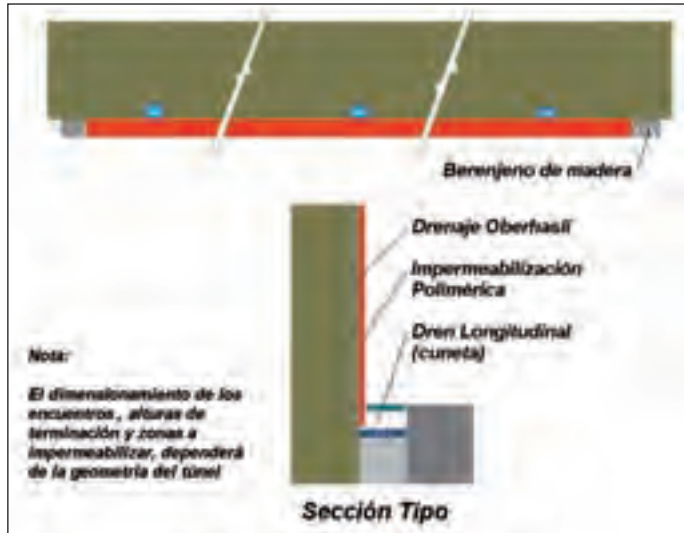


Figura 41.- Remate de la impermeabilización

Fase VII. Mediciones

Se recomienda hacer las Las mediciones según se detalla en la siguiente tabla:

Unidad de obra	Unidad de medicion	Forma de medicion
Drenaje	m	Longitud total terminada
Impermeabilización	m ²	En desarrollo*
Remates perimetrales	m	Longitud total terminada

Tabla 16.- Propuesta de mediciones en el Nuevo Sistema Oberhasli Sika

* La medición en el perímetro del túnel incluirá el sistema de impermeabilización completo y el desarrollo corresponderá a la línea de abono de excavación

7.8 Sistemas de impermeabilización de túneles bajo presión de agua con membranas flexibles

La impermeabilización de túneles bajo niveles freáticos, representa un gran problema de estanqueidad. Las últimas tecnologías apuestan por procedimientos mixtos de impermeabilización con membranas flexibles que permiten una inyección posterior en zonas previamente fijadas. Se exponen los diversos tipos de materiales, sus características, aplicación, normativa y control.



Foto 20.- Colocación de lamina de PVC-P en un túnel

7.8.1 Introducción

Los túneles se construyen hoy en día, con una durabilidad de más de 100 años, lo que implica que las exigencias de la construcción de túneles han de ser altas, en particular, aquellos que tienen que ver con los sistemas de sellado y de impermeabilización.

Los túneles ubicados por debajo del nivel freático, no deben de ninguna manera, ser dañados por el agua. Existen numerosas soluciones. El túnel puede ser construido como una estructura estanca, sin drenaje, con un sellado impermeable perimetral.

Una vez que se haya terminado la construcción, no es necesario reconducir las aguas subterráneas, y por consiguiente, no se produce una influencia negativa del nivel de agua ni de sus variaciones.

La decisión de renunciar a un sistema permanente de reconducción del agua, a favor de un sistema drenado, hace necesario proyectar un sistema constructivo y un sellado capaces de hacer frente a la presión del agua.

Esto significa en la mayoría de los casos, la modificación del concepto global del proyecto, y un incremento de los costes de construcción. Por otro lado, los costes de mantenimiento en los túneles sin drenaje son especialmente bajos.

En túneles drenados, el agua se conduce a los límites de la solera o a los pies de los hastiales, desahogando el túnel. Por otro lado, el agua conducida hacia el drenaje, absorbe componentes solubles de la roca y del hormigón.

Estos materiales, en combinación con el aire, y las condiciones particulares del propio conducto, pueden dar lugar a precipitados, que en el peor de los casos, llegarían a cegar el conducto completamente. Como consecuencia de esto, la presión de agua en los hastiales aumenta, con el consiguiente riesgo de daño para la estructura.

El drenaje debe funcionar perfectamente, para no comprometer el servicio ni la seguridad del túnel. Es necesario que regularmente se limpien con agua a presión, para eliminar depósitos calcáreos, con el consiguiente aumento de costes de mantenimiento. Los daños en los drenajes en la zona de solera no son sencillos de solventar, y suelen suponer altos costes y cortes de tráfico.

El sistema de impermeabilización de un túnel está compuesto por una combinación de varios factores. Un factor muy importante son las características propias de las membranas, aunque éstas no se puedan considerar separadas del resto de aspectos.

Por lo tanto, la impermeabilización en la construcción de túneles supone, por un lado, la membrana y su colocación, incluyendo la tecnología de soldadura/fijación, geotextiles, capa de drenaje, capa de protección, discos, Cinta PVC, etc., y por el otro, la preparación de la excavación soporte/sustrato ajustando el hormigón proyectado (granulometría, resistencia, rugosidad y regularidad), el hormigón/ andamiaje/ tecnología de inyección (soporte de la membrana contra la presión de agua, superficie lisa en la estructura interna del hormigón), y por último, aunque no menos importante el concepto de garantía de calidad.

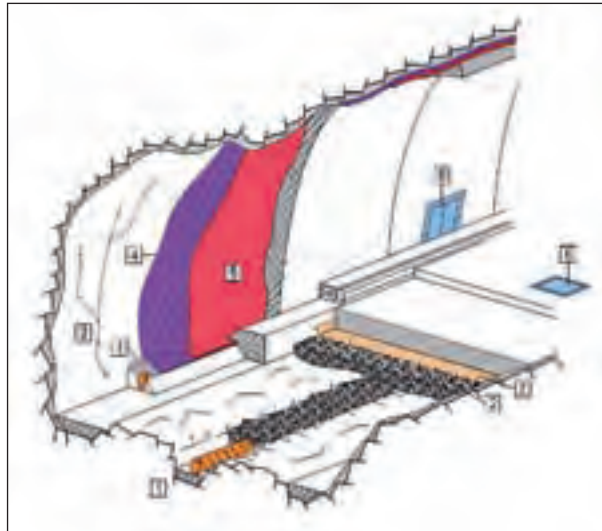


Figura 42.- Detalle del Sistema paraguas

1. Tubo de drenaje. Capa de drenaje con áridos seleccionados
2. Drenaje de solera
3. FlexoDrain para impermeabilización primaria
4. Capa de protección y drenaje
5. Láminas de impermeabilización Sikaplan – Sarnafil
6. Arquetas de inspección y reparación

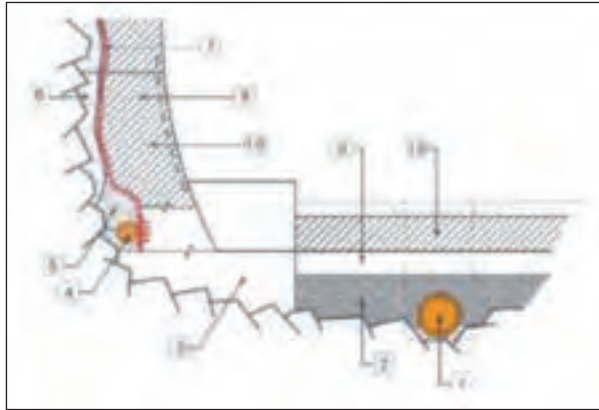


Figura 43.- Detalle de una sección del pie de hastial en el Sistema paraguas

1. Tubo de drenaje
2. Grava 30/50
3. Zapata
4. Drenaje longitudinal
5. Grava 30/50
6. Hormigón Proyectoado
7. Capa de protección y drenaje. Láminas de impermeabilización
8. Revestimiento estructural
9. Solera
10. Arquetas de inspección y reparación

Durante la última década, se han estudiado y probado diferentes materiales impermeabilizantes para túneles, principalmente en Suiza y en Alemania. Estos materiales están basados en componentes de poliolefinas (PE- poliestileno y PP- polipropileno) o cloruro de polivinilo (PVC-P).

Se realizó una exhaustiva evaluación para dos largos túneles en los Alpes Suizos, basados en los requerimientos establecidos por AlpTransit Gotthard AG y BLS AlpTransit AG.

Aspectos como gradientes geotérmicos, presiones litostáticas altas, y los requerimientos de servicio de la propia construcción para los 100 años previstos deberán tenerse especialmente en cuenta.

Se han probado productos poliméricos combinados con los sistemas de impermeabilización en un programa de 24 meses de duración.

Además, se complementaron con otras pruebas, por ejemplo, tratamiento con agua a elevadas temperaturas enriquecida con oxígeno, realizando ensayos de compresión, analizando el comportamiento combinando la compresión lateral y la rotura a cortante horizontal, y las pruebas de instalación. Bajo el revestimiento, ambos tipos de materiales cumplieron con los requerimientos establecidos.

El problema en la aplicación de túneles a veces viene dado por la dureza del material y por las dificultades de la soldadura a mano, particularmente en condiciones húmedas e incómodas, o por ejemplo, en refugios, secciones de cruces, soldadura en puntos de detención del agua, soldadura de remiendos, etc.

Posiblemente, el aspecto más importante en las operaciones de impermeabilización sea la soldadura de membranas, la cual debe ser llevada muy cuidadosamente para mantener una continuidad en el sistema; cualquier fallo en la soldadura causará una fuga en el túnel, con una consecuencia fatal si se presenta el agua bajo presión. Las características más importantes son la flexibilidad de las membranas de PVC-P y la facilidad en la soldadura.

7.8.2 Concepto de la impermeabilización completa

Para los túneles diseñados bajo nivel freático y con presión de agua, hay que considerar algunos puntos técnicos:

Soporte/ hormigón proyectado

Las cerchas o cuadros, mallas de armadura, bulones y el hormigón proyectado se usan como sostenimiento de la excavación.

Toda la superficie del hormigón proyectado, se prepara adecuadamente para conseguir la suavidad y regularidad necesaria para preservar la integridad de la membrana.

A veces, hay que usar hormigón proyectado adicional cuando hay muchas irregularidades para conseguir el soporte adecuado. Además, debe reunir las características que aparecen a continuación.

La superficie del hormigón proyectado debe reunir las siguientes características como soporte en la instalación de la membrana para que sea considerado como aceptable:

- $B_A : B_T = 10 : 1$
- Las irregularidades a pequeña escala deben tener un radio mayor de 300 mm
- El tamaño máximo del árido del hormigón debe ser como máximo 8 mm

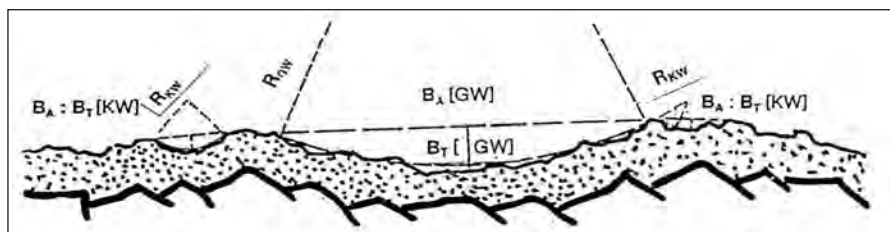


Figura 44.- Características geométricas del hormigón proyectado soporte

Drenaje primario

El hormigón de sostenimiento en solera debería tener un drenaje primario temporal que debería funcionar incluso después de que la impermeabilización y el revestimiento hayan sido instalados, para que el área de trabajo se mantenga seca.

El sistema “well-point” de tubos de acero de drenaje se colocará a intervalos, con una distancia de aproximadamente 100 m, para permitir el bombeo (bajada de nivel freático) durante la construcción.

El agua de los drenajes penetra por debajo de la membrana impermeabilizante y se asocia herméticamente con ella a través de las bridas perdidas.

Fijación de la membrana

Los discos o arandelas de sujeción se instalan en la superficie del hormigón proyectado para proporcionar un anclaje adecuado y ser un ajuste para toda la superficie del hormigón. La membrana impermeabilizante se sitúa con la capa de señalización hacia el interior del túnel y con la suficiente flojedad como para prevenir la sobre-tensión del hormigonado estructural posterior.

Podemos mencionar nuevos métodos de sujeción, como por ejemplo el sistema de disco con Velcro, el sistema de termosoldadura por aire caliente, etc., que permite, entre otras cosas la instalación de andamios con una extensión de aproximadamente 4 m, y así reducir el número de juntas, por lo que se consigue una mayor calidad y seguridad.

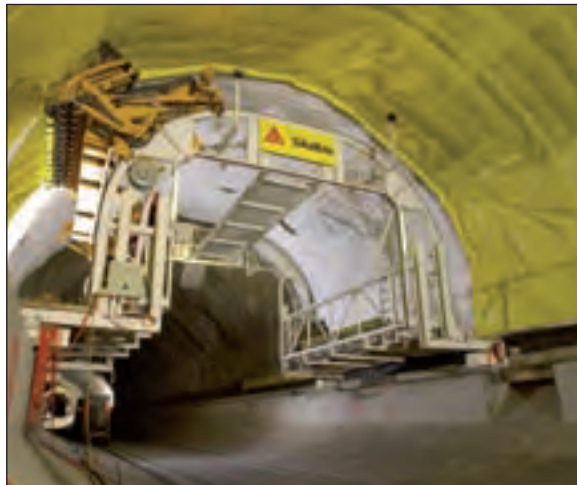


Foto 21.- Carro de colocación de lámina

Sistema de sellado

En los túneles sin drenaje preliminar que son estabilizados mediante hormigón proyectado, se instalarán las membranas entre el hormigón proyectado y el hormigón estructural.

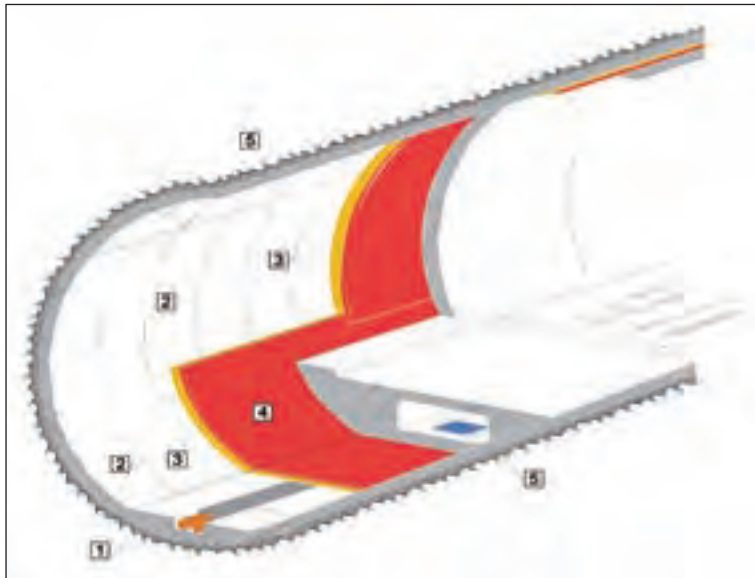


Figura 45.- Sistema de sellado alrededor de todo el túnel

1. Drenaje longitudinal y capa de drenaje de grava
2. Drenes en juntas de dovelas y en juntas como impermeabilización primaria
3. Geotextil de protección y drenaje
4. Membrana Sika Plan y Membrana de protección en soleras
5. Arquetas para inspección y limpieza2.

Se escogerán entre los siguientes sistemas, dependiendo de la fuerza de la presión del agua y del estado de la misma:

- a) Membrana de sellado de una capa alrededor de todo el túnel
- b) Membrana de sellado de una capa alrededor de todo el túnel combinada con un revestimiento interior de hormigón estructural
- c) Doble membrana de sellado alrededor del túnel

En algunos casos de revestimiento en túneles excavados mecánicamente (TBM), se instala una membrana entre las dovelas y el hormigón estructural posterior (Túneles de doble revestimiento), como un sellado completo.

Geotextiles

Como las membranas son sensibles a los daños mecánicos, se instala una capa de geotextil entre el soporte y la membrana de impermeabilización para proteger el sellado de la misma y como capa drenante.

Otra función del geotextil es crear una superficie deslizante que evite las tensiones dentro de la membrana, y que permita los movimientos de la estructura del hormigón provocados por la temperatura, hundimientos, cargas dinámicas, etc., y por consiguiente, que evite fisuras en la estructura del hormigón.

Antiguamente, las capas de protección y los puntos de intersección en la estructura del hormigón causaban algunas deficiencias muy caras. Este tipo de deficiencias han de ser solventadas en el futuro.

El geotextil debe proteger la membrana durante la construcción y operación en el túnel. Se deben considerar los siguientes aspectos:

- El geotextil ha de ser lo suficientemente robusto, y los elementos de sujeción deben ser los adecuados y estar dispuestos de tal forma que el geotextil no quede demasiado estirado
- El geotextil no tiene una función predominante de drenaje
- El geotextil ha de ser suficientemente resistente a los ácidos y al álcali
- El geotextil ha de mantener las propiedades necesarias para su correcto funcionamiento durante la operación completa en el túnel, resistiendo la presión bajo las condiciones medioambientales que haya
- El geotextil ha de cumplir con los requerimientos en caso de fuego

Anteriormente se instalaban los geotextiles con una masa de 500 g/m². La nueva recomendación es instalar un no-tejido (geotextil) de polipropileno, con un uno por ciento de materiales sintéticos y con una masa de 500 g/m² -

1000 g/m². Por otro lado, la compresión y el espacio entre la membrana y el hormigón debe ser la menor posible.

Membrana/Cintas flexibles de PVC/Bridas de inyección

El túnel se construye completamente impermeable. Tanto la solera o contrabóveda como la bóveda reciben la membrana impermeable.

La mayoría de las normas en Europa recomiendan un espesor de la membrana de 3.0 mm. para los casos túneles bajo presión de agua, en lugar de 2 mm de espesor en caso de filtraciones, para conseguir una mejor resistencia y aumentar las garantías.

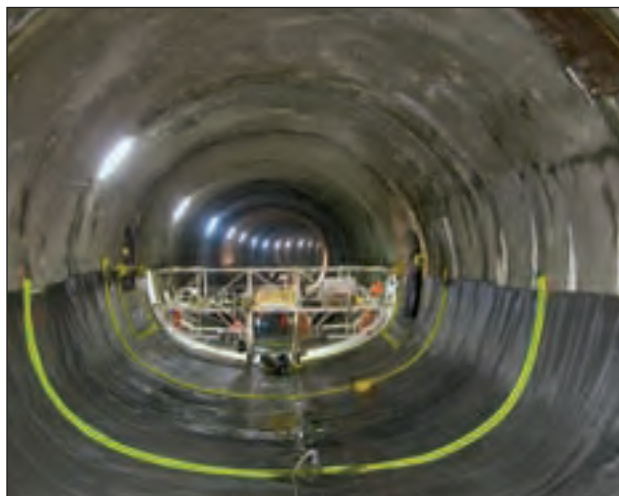


Foto 22.- Membrana de protección en solera y cintas flexibles de PVC

Además, la membrana impermeable cuenta con una capa señalizadora, por ejemplo, una fina capa de un color distinto y reflectante, para facilitar la detección del daño en la instalación, incluso antes o después de la instalación.

En la solera o contrabóveda la membrana está protegido por otra membrana de 3.0 mm de espesor, soldada a la membrana impermeable. Esto la protege contra los daños mecánicos en trabajos posteriores.

En cada compartimiento (previamente diseñado según proyecto) se instala una cinta flexible de PVC (juntas de hormigonado) como barrera radial de estanqueidad (de 600 mm ancho, de 6 ribetes, ajustadas a unas mangueras y bridas de inyección) para frenar el agua que pueda llegar a los compartimentos y evitar filtraciones de varios metros, en casos particulares incluso de cientos de metros.

El material de los dispositivos de detención del agua ha de ser compatible con la membrana, siempre en los términos de durabilidad y de los parámetros de soldadura.

Para que la detención del agua funcione correctamente es importante que los ribetes interiores de la matriz de las cintas flexibles de PVC estén completamente integradas en el revestimiento estructural de hormigón (poniendo especial atención en la bóveda).

Su posición debe coincidir con las juntas de la estructura, para que la membrana quede más protegida, y debe estar también en combinación con la propia estructura hermética del hormigón para que logre un sistema adicional de estanqueidad.

Las bridas integradas de inyección son colocadas profilácticamente para posibles trabajos posteriores de reparación. En ésta conexión y sistemáticamente se tomarán previamente las debidas precauciones para poder inyectar el contacto entre la membrana y el revestimiento de hormigón, en los casos de aparición de filtraciones posteriores.

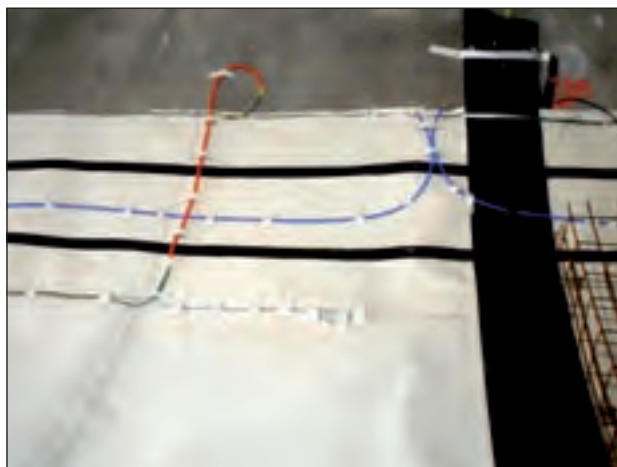


Foto 23.- Bridas y conductos de inyección

Hormigón

Como revestimiento permanente estructural la mayoría de los túneles irán con un revestimiento estructural de hormigón armado. Su colocación se ejecutará en dos fases: primero la contrabóveda o solera y posteriormente hastiales y bóveda, ambos con avances de 10.0 a 12.0 m.

El espesor mínimo de la bóveda será de 35 a 60 cm y el de la contrabóveda o solera de 45 a 65 cm, teniendo en cuenta las condiciones geológicas, la capa freática y la sobrecarga.

El estado de la contrabóveda o solera de hormigón es muy importante para las tensiones que actúan desde el exterior hasta la parte interna, como son la deformación del terreno y la presión del agua.

De algunos años a esta parte, hay disponibles muchas pruebas a realizar para la parte interna de la estructura del hormigón. Los errores principales se han detectado en las bóvedas y en las juntas de hormigonado.

Antiguamente no se tomaban en cuenta ni el estado de la superficie exterior ni la estructura interna del hormigón. Si la membrana tiene una tensión importante, ésta puede haber sido causada por la bóveda, especialmente si la armadura se descubre.

Para prevenir áreas defectuosas en la bóveda del hormigón de revestimiento, se realiza una inyección posterior de lechada de cemento, una vez completado el revestimiento mediante, por ejemplo, una manguera de inyección horizontal (19 mm), para dicha inyección de cemento, acoplada previamente a la membrana plástica de la bóveda.

Los separadores que sostienen el acero de la armadura situado en el molde del hormigón, no deben causar daño a la membrana y deben tener un contacto total con la superficie de la membrana.

Las armaduras y otras partes metálicas embebidas deberán tener una separación de mínima de 50 mm sobre la membrana.

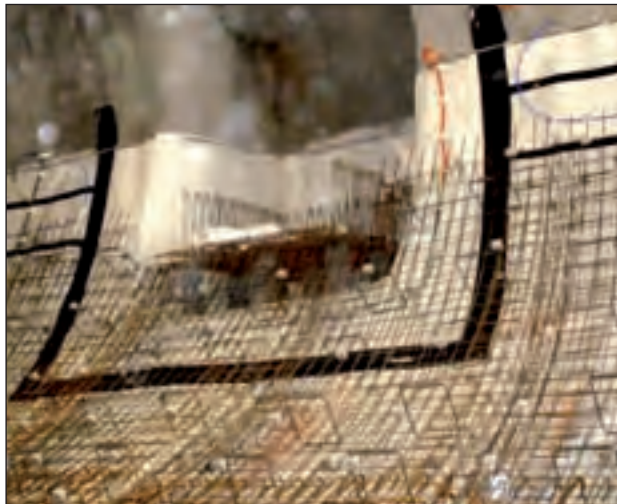


Foto 24.- Separación de armaduras y embebidos con la membrana

Tecnología de soldadura/ Seguro de calidad

Las soldaduras entre las membranas deberán estar solapadas con una distancia en los extremos de al menos 100 mm y en los costados de al menos 80 mm, estando las juntas dispuestas de tal forma que no haya más de tres capas de membrana en superposición en ningún punto.

Las membranas se sueldan empleando máquinas de termosoldadura, tal y como recomienda el fabricante, para proporcionar una unión de doble soldadura con canal central donde se pueda después ensayarlas con aire comprimido.

Se analiza la tensión y la fuerza mecánica de la doble soldadura creada de esta manera, y se comprueba que aguanta aproximadamente una presión de 2 bares durante un periodo de al menos 10 minutos y con una pérdida de presión que no supere el 20%.

Para las soldaduras manuales la prueba se realiza utilizando el ensayo de vacío. Para áreas de membrana de espacio limitado tales como configuraciones especiales de uniones o reparaciones locales, se debe emplear un equipo de vacío. Esto consiste en una campana de vacío, que ajustada sobre la zona a evaluar, desocupa el aire bombeando vacío, con el fin de detectar posibles fugas en la membrana.

Se garantizan unas altas exigencias de calidad. Cada soldadura, cada sección compartimentada y cada anomalía se anota y se archiva. Se utiliza un método previamente aprobado para detectar daños tanto en la membrana como en todos los elementos embebidos en el hormigón de revestimiento. Cada soldadura y solapo, incluyendo los de las cintas flexibles de PVC, se prueban en presencia del Director de Calidad, durante todo el proceso.

Las soldaduras que no pasan las pruebas se reparan y se vuelven a ensayar hasta que consiguen pasar las pruebas. El contratista mantiene una grabación de cada prueba en cada junta.

Después de la instalación del sistema de impermeabilización con membranas pero antes de colocar cualquier capa protectora, se inspecciona la totalidad del área de la membrana en busca de zonas dañadas tales como abrasiones o perforaciones. Estas zonas se repararán con un trozo adicional de membrana y se probarán con el equipo de vacío hasta que el resultado sea satisfactorio.



Foto 25.- Equipo de doble soldadura y campana de vacío

7.8.3 Conclusiones del sistema

Hoy en día los túneles se construyen cada vez en lugares geológicos más difíciles, ya sean condiciones rocosas o zonas con una alta presión de agua. En tales zonas es muy difícil construir túneles.

En el caso de la presión de agua, un solo agujero en la membrana puede causar un daño casi imposible de reparar si antes no se han previsto una serie de medidas preventivas, tales como compartimentización o áreas con posibilidades de futuras inyecciones, etc.

El sistema que consiste en emplear membranas plásticas de 3.0 mm de espesor para la presión del agua es técnicamente de confianza, eficiente y bueno para el medio ambiente. La calidad es la suma de las propiedades y características de un producto que relacionan lo acorde y el desempeño de los requerimientos previstos.

El objetivo primordial es garantizar tales propiedades en un primer momento, sin corrección alguna, sólo de acuerdo con el eslogan: ¡hazlo bien a la primera!

7.9 Conclusiones de la impermeabilización de túneles

Como resumen de todo lo expuesto en cuanto a la impermeabilización de labores subterráneas, quisiéramos destacar las siguientes conclusiones:

- 1º Dada la frecuencia con que se repiten las averías en los túneles debidas a humedades, filtraciones y fugas, parece aconsejable dedicar una mayor atención a los Proyectos, en relación con los métodos, procedimientos y materiales de revestimiento, en túneles nuevos, a fin de conseguir con ello una impermeabilización apropiada con las máximas garantías de eficacia y durabilidad
- 2º Los costes de impermeabilización para un túnel ya ejecutado son siempre superiores a los costes de la impermeabilización de un túnel en ejecución
- 3º El sistema de impermeabilización en la construcción de un túnel debe ir en consonancia con el sistema de excavación y revestimiento elegidos
- 4º Toda impermeabilización está compuesta de varias fases y la elección del conjunto de ellas es lo que define un sistema
- 5º Es más económico y sencillo no desplazar el agua, sino captarla, drenarla y dirigirla a las cunetas

8 CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES CON MÁQUINAS TUNELADORAS

8.1 Introducción

La proliferación de grandes obras subterráneas en los últimos tiempos, ha permitido el desarrollo de nuevos equipos de excavación, más versátiles y seguros.

Por otro lado, las crecientes exigencias en Proyecto en cuanto a los requerimientos del hormigón y morteros en la ejecución de túneles con TBM en España, han propiciado el desarrollo e implementación de nuevos productos, sistemas y tecnologías.

En función del tipo de Tuneladora seleccionado Sika ha desarrollado una amplia gama de productos y equipos auxiliares para su aplicación en labores subterráneas ejecutadas mediante este método constructivo.

- **Hormigón proyectado:** Robots montados en la TBM, aditivos superplastificantes, acelerantes de fraguado, estabilizantes, humo de sílice,...
- **Espumas:** Agentes espumógenos para el transporte del material extraído, reductores de abrasión, antipolvo, polímeros, desestructurantes y antiespumantes sintéticos para el tratamiento posterior del suelo extraído junto con las espumas.



Foto 26.- Detalle de las espumas en una TBM

- Fabricación de dovelas: Superplastificantes, sistemas de reparación, desencofrantes, acelerantes de endurecimiento, etc



Foto 27.- Fratasado de dovela base. Acopio de dovelas

- **Morteros proyectados refractarios:** Para la protección del hormigón en túneles.
- **Morteros de relleno de trasdós:** Aditivos plastificantes y superplastificantes, aireantes, estabilizadores y acelerantes.
- **Aditivos Tixotrópicos:** Aditivos tixotropantes para morteros de inyección.
- **Inyecciones:** Resinas sintéticas y poliuretanos para inyecciones de impermeabilización y consolidación.
- **Equipos auxiliares:** Bombas, depósitos,...

En los siguientes apartados iremos desarrollando cada una de las aplicaciones en la que Sika como proveedor de productos químicos para la construcción entra a formar parte de los distintos procesos implicados en la ejecución de túneles con máquinas tuneladoras así como su empleo y descripción de ejemplos prácticos.

En primer lugar se llevará a cabo una descripción general de los distintos tipos tuneladoras existentes en el mercado dependiendo de las características de la obra y del suelo o roca a excavar.

8.2 Túneles con máquinas tuneladoras TBM

Una tuneladora o T.B.M. (del inglés Tunnel Boring Machine) es una máquina capaz de realizar la excavación de túneles a sección completa, a la vez que simultáneamente procede a la colocación de un sostenimiento (si éste es necesario), ya sea en forma provisional o definitiva.

La excavación del terreno se realiza normalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos (alimentados a su vez por motores eléctricos). También existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabeza giratoria.

El empuje necesario para ir avanzando 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 obtiene un punto fijo desde donde empujarán.

Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa el denominado “back up” de la tuneladora, constituido por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que ruedan sobre raíles que la misma tuneladora va colocando.

En el “back up” 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 necesario amortizar el precio de la máquina y rentabilizar el tiempo que se tarda en diseñarla, fabricarla, transportarla y montarla (que puede llegar a los dos ó tres años).

Además, los túneles a excavar con tuneladora tienen que tener radios de curvatura elevados porque las máquinas no aceptan curvas cerradas, y la sección tiene que ser circular en túneles excavados con cabeza giratoria.

Tipos de tuneladoras:

Las tuneladoras se pueden dividir en dos principales grandes grupos: los topos y los escudos, aun cuando también existen tuneladores mixtas y otras como microtuneladoras y escudos excavadores.

Microtuneladoras y escudos excavadores

Las microtuneladores son máquinas principalmente empleadas para trabajos urbanos de instalaciones de gas, agua y electricidas. Los escudos excavadores son un caso muy particular de las máquinas tuneladoras cuyo sistema de excavación es similar a las máquinas rozadoras habituales en minería.

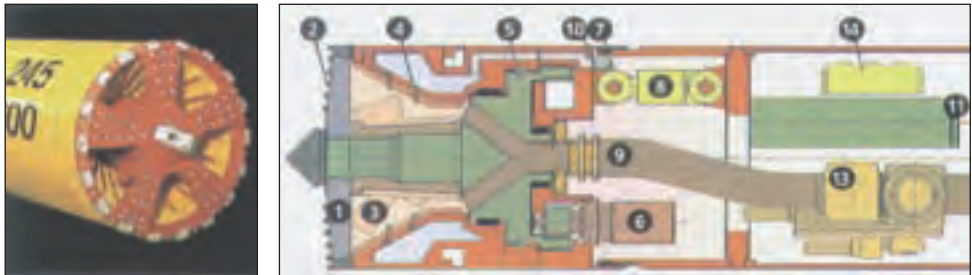


Figura 46.- Detalle Microtuneladora y esquema – sección de la misma

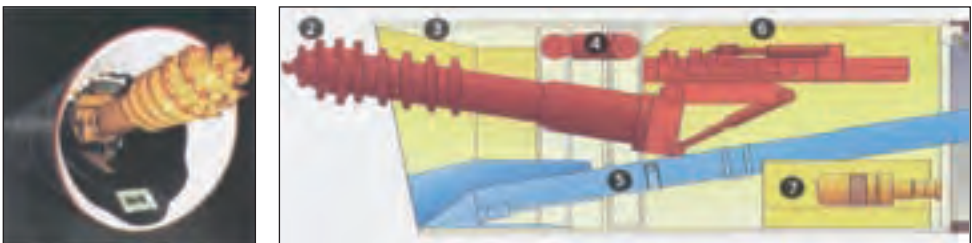


Figura 47.- Escudo excavador y esquema – sección del mismo

Topos

Los topos son tuneladoras diseñadas para excavar rocas duras o medianas, en los cuales no existan demasiadas exigencias ni 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.

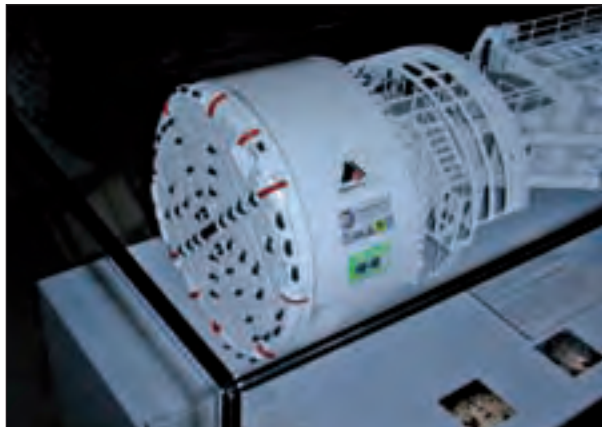


Foto 28.- Detalle de una maqueta de un topo

La fuerza de empuje se transmite a la cabeza de corte mediante los llamados cilindros de empuje. La reacción producida se transmite al hastial del túnel mediante los grippers.

Éstos 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 necesitará reposicionar los 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 para excavar rocas blandas o suelos, y en general todo tipo de terrenos que necesiten sistemáticamente la colocación de un sostenimiento provisional.

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.

Este sostenimiento definitivo normalmente consiste en una serie de anillos formados por unas 7 dovelas de hormigón, garantizándose en todo momento la estabilidad del túnel. Frecuentemente los escudos están preparados para trabajar y avanzar bajo el nivel freático.

El escudo consiste en una tuneladora de cabeza giratoria, que suele estar equipada con picas (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 hay todo el sistema de perforación: primero los cilindros perimetrales (con un recorrido entre 1,20 y 1,80 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.

Posteriormente se procederá a la inyección de un mortero de relleno en el trasdós de las dovelas, para llenar el hueco de 8 a 12 cm de espesor existente entre las dovelas de hormigón y el perfil del terreno excavado.



Foto 29.- Detalle de la cabeza de corte de un escudo

A su vez los escudos se pueden dividir en otros tipos diferentes, de entre los que se distinguen las tipologías que se explicitan a continuación:

Escudos de frente abierto: Se utilizan 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.

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 obligatoriamente circular. Los escudos de frente cerrado a su vez pueden ser:

- a) **Escudos con cierre mecánico:** En ellos la entrada y la salida del 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:** En desuso.
- c) **Escudos de bentonita o hidroescudos:** Mediante la inyección de bentonita se consigue estabilizar el terreno debido a sus propiedades tixotrópicas y a la mejora que facilita en el transporte del material de excavación mediante bombeo.

- d) Escudos de balance de presión de tierras o EPBs:** El material de excavación se extrae del cuarto de tierras mediante un tornillo de Arquímedes. Variando la fuerza del 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 para aumentar la plasticidad de los terrenos. Hoy en día, las EPB son la tecnología predominante en cuando a la excavación de túneles bajo nivel freático.

Doble Escudo

Otra modalidad de tuneladora de tipo escudo es la denominada **Doble escudo**. 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.

El movimiento de estas dos partes del escudo es independiente, por lo que la cabeza puede excavar de manera prácticamente continua, mientras que la cola del escudo se va deteniendo para ir montando los anillos. Los rendimientos alcanzados con este sistema son mucho mayores que con un escudo simple.

8.3 Productos sika en tuneladoras

Sika, líder mundial en química de la construcción en obras subterráneas, consciente de la importancia que esta nueva tecnología existente para la ejecución de terrenos ha alcanzado y alcanzará en el futuro, ha introducido una nueva gama completa de productos dirigidos a su utilización en este segmento de mercado.

Muchos de ellos se están utilizando desde hace años como son los aditivos superplastificantes de última generación de la gama Sika Viscocrete, empleados para la fabricación de dovelas de hormigón, así como los aditivos para el mortero de relleno de tradós de las dovelas, y otros nuevos productos tales como las espumas y los desestructurantes completarán una amplia gama dirigida para ayudar a los constructores de estas grandes obras de ingeniería civil.

La alta involucración por parte de Sika en la ayuda y en las mejoras técnicas susceptibles de demostrarse en la misma obra, han dado lugar a esta amplia gama de productos que intervienen en las diferentes fases de ejecución de un túnel excavado con Tuneladora TBM o Escudos de Presión.

A continuación describiremos cada uno de los procesos de producción de un túnel excavado con TBM en los que Sika entra a formar parte con el suministro de diversos productos según el caso.

8.3.1 Fabricación de dovelas

Como hemos visto anteriormente, la formación del anillo de dovelas de hormigón compone la sección definitiva del túnel. Dichos anillos de hormigón facilitarán a su vez el avance de la máquina tuneladora, apoyándose sobre ellos los cilindros de empuje, mientras al mismo tiempo el escudo frontal gira excavando el frente del túnel.

Por este motivo, al inicio de un proyecto de esta envergadura será de suma importancia el establecer las características de resistencia a compresión de dichas dovelas de hormigón.

Las exigencias en España en cuanto a las características de resistencia a compresión de dicho tipo de hormigones varían entre los 40 MPa hasta los 110 MPa exigidos en las últimas obras de excavación de los túneles de Pajares del AVE entre León y Asturias.

Por ello, se deberá realizar un concienzudo y detallado diseño de las mezclas de hormigón de acuerdo con las características exigidas. Se deberá comenzar con los ensayos previos en laboratorio con un gran tiempo de antelación a la instalación de la máquina tuneladora con el fin de conseguir asegurar las resistencias a compresión del hormigón.

Se deberán definir el tipo de cemento, los tipos de áridos, su granulometría, su tamaño máximo, así como sus propiedades geomecánicas para establecer dosificaciones de partida con el fin de asegurar tanto las resistencias iniciales necesarias para el desmoldeo de la pieza en la fábrica de hormigón como las resistencias finales a 28 días.

En cuanto al tipo de cemento siempre se recomendará la utilización de un cemento de fraguado rápido, del tipo I 52.5 R, ya que serán los únicos que nos aseguren el cumplimiento de las resistencias iniciales necesarias para el desmoldeo.

Hay que tener en cuenta que en este tipo de plantas de fabricación de dovelas prefabricadas, se exigen unas resistencias mínimas para el desmoldeo de las dovelas entorno 150 kg/cm², por lo que la optimización del tipo de cemento influirá positivamente en el tiempo necesario para conseguir dicha resistencia.



Foto 30.- Planta de hormigón de dovelas en los túneles de Pajares

De esta forma, los rendimientos de la planta de dovelas se optimizarán igualmente, consiguiéndose dichas resistencias entre las 5 y 6 horas desde el momento de su fabricación.

Se recomienda comenzar con los ensayos previos del hormigón, utilizando para ello los sistemas de cajones adiabáticos mencionados en capítulos anteriores, manteniendo las probetas de hormigón en condiciones similares a las que se encontrará el hormigón dentro de la cámara de curado.

Para ello, se deberán mantener las probetas durante todo el tiempo en condiciones de saturación de agua (sumergidas), así como a una temperatura constante de 60°C. Se recomienda ir realizando series de pruebas con diferentes cantidades de cemento con el fin de poder optimizar económicamente el precio del hormigón, alcanzando la menor cantidad de cemento posible con el fin de alcanzar de forma segura las resistencias exigidas.

Se deberá asegurar las resistencias por encima de un 10% de las exigencias, ya que la no detección de un problema en las resistencias puede suponer un coste económico difícil de asumir por la planta de prefabricados.

La relación agua/cemento así como la consistencia del hormigón serán otros elementos fundamentales en la obtención de una dovela de calidad. Al necesitarse unas resistencias iniciales tan elevadas para conseguir un nivel de producción aceptable, será necesario reducir en gran medida la cantidad de agua.

Normalmente se trabaja en este tipo de piezas con relaciones agua/cemento de 0,34-0,36, para lo cual se hace necesario el empleo de aditivos superfluidificantes especiales a base de policarboxilatos como son:

▲ Sika Viscocrete 20 HE

▲ Sika Viscocrete 3425

Esta gama de productos a base de policarboxilato se han diseñado específicamente para este tipo de trabajos, asegurando la obtención de unas bajas relaciones agua/cemento así como unas elevadas resistencias iniciales. Su dosificación dependerá de las exigencias de resistencias, del tipo de cemento así como de los áridos empleados.

Una vez definida la dosificación de partida, se comenzará con el proceso de fabricación de las dovelas. Dada la forma especial circular de este tipo de piezas prefabricadas, se emplearán en el carrusel moldes especiales circulares.

Dichos moldes deberán ser convenientemente tratados con un aditivo desencofrante de última generación del tipo Sika Separol 32 Vegetal, producto que asegurará una óptima calidad de acabado final. Posteriormente se colocará en el interior del molde la correspondiente armadura con sus separadores de hormigón.

Es el momento de proceder al vertido del hormigón en el molde. Para ello, la mezcla de hormigón deberá tener una consistencia uniforme y mantenida en un margen entre 0-2 cm, ya que por un lado si el hormigón estuviera demasiado fluido se formaría una “panza” en la parte superior de la pieza que afectaría a su geometría, a su espesor, así como a la resistencia final del anillo.

Por otro lado, si la mezcla de hormigón estuviera demasiado seca, aumentaría considerablemente el tiempo de vibración del molde, con el correspondiente riesgo de producirse una segregación del hormigón, además de influir negativamente en la productividad de la planta de prefabricados.

Una vez relleno el molde se procede al fratasado de la pieza por su parte externa, utilizando llanas o regletas vibratorias

Una vez fabricada la pieza se introduce la misma en la cámara de curado, en la cual se mantienen las mismas en unas condiciones de 100% de humedad y a una temperatura constante de unos 60°C.

Al **salir** las piezas de la cámara de curado se desencofran las piezas extrayéndolas de sus moldes mediante ventosas, se les colocan las juntas o perfiles hidroexpansivos, se comprobaban las trompetas de inyección, y se revisan las mismas por si se hubiera producido algun desconchón o defecto durante el proceso de fabricación.

Para efectuar esta reparación se emplean morteros de reparación especiales del tipo **Sika Monotop 620, Sika Monotop 618, Sika Monotop 612.**

8.3.2 Ejemplos y casos prácticos de dosificaciones para fabricación de dovelas

A continuación, expondremos una serie de fórmulas tipo empleadas en distintas plantas de fabricación de dovelas para la obtención de Resistencias Características de 40, 60, 80 MPa. Finalmente estudiaremos el caso particular del Hormigón de Altas Resistencias (H.A.R.) para dovelas con resistencias características de 120 MPa, analizando sus particularidades tras la experiencia de las dovelas fabricadas para los Túneles de Pajares.

En los ejemplos que expondremos a continuación se ha supuesto un cemento CEM I 52,5 R. Para este tipo de prefabricados también es muy común el empleo de otros cementos tipo CEM I 52 N y CEM II A-S 52,5 N aunque las cantidades empleadas en comparación con los ejemplos no difiere sustancialmente.

Por otro lado, estas formulaciones han sido realizadas empleando un árido de naturaleza caliza en todos los casos, aunque es bastante habitual el empleo de otras naturalezas como áridos silicios, cuarcitas o mezcla de los anteriores.

Todos los ejemplos han sido fabricados empleando el aditivo superplastificante Sikaviscoconcrete 20 HE, que proporciona gran reducción de agua a la mezcla confiriéndole asimismo una gran facilidad para el llenado de los moldes disminuyendo el tiempo de vibración necesario para un correcto llenado de los mismos. Dedicaremos un apartado especial a las características y su efecto en los H.A.R.

Dosificación para HA-40

Dosificación	Kg	L
Arena 0-6	964	361,05
Gravilla 6-12	533	200,38
Grava 12-20	643	241,73
Cemento I 52,5 R	325	104,84
Agua a/c=0,35	115	115,00
Sikaviscoconcrete 20 HE (0,80%)	2,6	2,41
Total	2582,6	1025,4

Dosificación para HA-60

Dosificación	Kg	L
Arena 0-6	909	340,45
Gravilla 6-12	516	193,98
Grava 12-20	638	239,85
Cemento I 52,5 R	375	120,97
Agua a/c=0,34	127	127,00
Sikaviscoconcrete 20 HE (0,90%)	3,38	3,13
Total	2568,4	1025,4

Dosificación para HA-80

Dosificación	Kg	L
Arena 0-5	878	329,1
Gravilla 5-10	497	186,9
Grava 10-20	616	231,9
Cemento I 52,5 R	425	137,09
Agua a/c=0,32	136	136
Sikaviscocrete 20 HE (1%)	4,3	3,9
Total	2556,3	1024,89

8.3.3 Hormigón de alta resistencia para dovelas HA-120

Las características de los hormigones prefabricados para Dovelas TBM, tales como, consistencia, tiempo de amasado, resistencias iniciales, curado en cámara húmeda, diseño del molde, etc. unidas en el caso que se analiza, a unas resistencias finales elevadas (hasta 120 MPa), precisan el empleo, tanto de materiales (áridos y cemento) adecuados, como de aditivos superplastificantes de última generación capaces de garantizar relaciones a/c por debajo de 0,30, y manejabilidades acordes con el proceso de fabricación.

A continuación, analizaremos cada uno de los anteriores parámetros necesarios para la fabricación de los Hormigones de Alta Resistencia, comenzando con los materiales empleados.

Áridos

Los áridos necesarios para la fabricación de H.A.R. estarán compuestos de partículas limpias, duras, resistentes y de una calidad uniforme. Su forma será redondeada o cúbica y contendrá menos del 15% de partículas planas, delgadas o alargadas, definiendo como una partícula alargada aquella que tiene su máxima dimensión cuatro veces mayor que la mínima.

Los áridos empleados deben ser de una naturaleza tal que garantice una Resistencia a Compresión Simple del orden de las resistencias que se pretenden alcanzar en el hormigón.

Una Resistencia a Compresión Simple por debajo de la Resistencia Característica del Hormigón imposibilita la consecución de las mismas, al producirse la rotura de los áridos en la probeta a ensayar, con anterioridad a la de la matriz que los rodea.

Es habitual utilizar mezcla de áridos de distinta naturaleza para favorecer determinadas propiedades de la mezcla, tales como su cohesión, compacidad y puesta en obra.

Teniendo en cuenta la importancia de la naturaleza del árido, uno de los factores determinantes es la elección de un tipo adecuado. Para la fabricación de H.A.R. los áridos empleados más frecuentemente, a tal efecto, son cuarcitas de alta calidad u ofitas. También se han realizado ensayos a nivel de laboratorio con corneanas.

Por otro lado se ha comprobado que independientemente de la naturaleza y de la forma del árido, áridos con una superficie muy regular o desgastada en cierto grado perjudican la consecución de H.A.R.

Esto es debido a que un árido con un mayor grado de irregularidad en superficie mejora las condiciones de la interfase matriz-árido, dificultando que en el ensayo de las probetas se produzcan roturas por los planos de unión. Esta cualidad debe ir ligada, en todo caso, a un bajo grado de desgaste de los áridos para evitar la rotura de las aristas de los mismos.

Otro parámetro importante a tener en cuenta para la fabricación de los H.A.R. es la elección adecuada del tamaño máximo de árido a utilizar. Por un lado el tamaño máximo debe ser lo suficientemente grande para asegurar la Resistencia a Compresión Simple necesaria.

Sin embargo, el tamaño máximo debe ser lo suficientemente pequeño para evitar que el árido pueda fracturarse a través de las diaclasas que pueda contener. El tamaño máximo más habitual utilizados en H.A.R. es 12 mm, aunque también se han realizado ensayos con valores desde 9 a 14 mm con resultados satisfactorios.

En cuanto a las proporciones de cada fracción de los áridos utilizados en la mezcla habrá que tener en cuenta que la granulometría resultante de la mezcla de los mismos deberían tender a ajustarse a las curvas normalizadas para la realización de hormigones prefabricados (Fuller, Bolomey, Faury), con el fin de asegurar la máxima compacidad del hormigón.

De todas formas, habrá que considerar que al tratarse de Hormigones de Alta Resistencia, la mayor proporción de las fracciones de mayor tamaño favorecerán la consecución de resistencias más elevadas, siempre que se asegure una buena compacidad.

De acuerdo a las experiencias recopiladas, la proporción de la fracción o fracciones por encima de 6 mm debería ser superior al 45 %, quedando el 65% restante reservado a la mezcla de arenas adecuadas para la consecución de la máxima compacidad dentro de las curvas normalizadas.

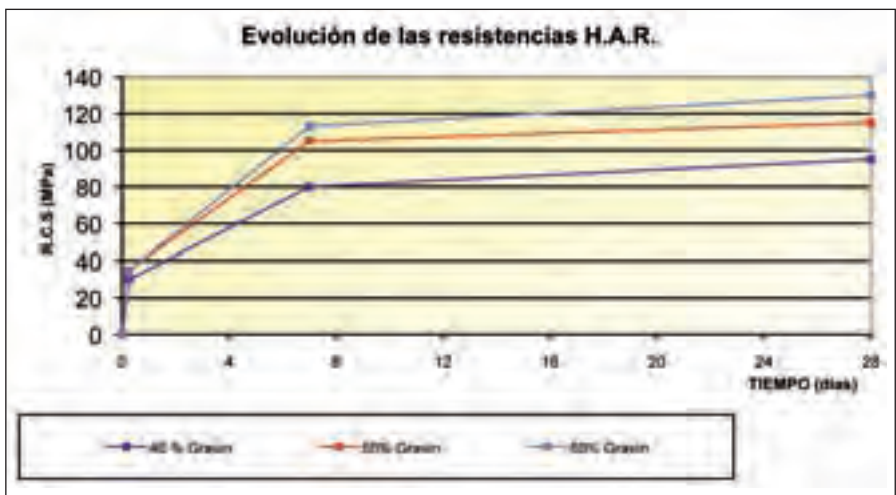


Figura 48.- Relación Resistencia / Contenido Gravilla

Cementos

La elección del tipo de cemento para la fabricación de H.A.R. es otro factor tanto o más importante que la elección de un árido adecuado. Es por ello que la elección tanto de una clase resistente, de un tipo y una cantidad adecuados para la fabricación de H.A.R. debe ser estudiado con detalle. A tal efecto, señalaremos los siguientes aspectos:

El Tipo de cemento a utilizar, al igual que la Clase Resistente, dependerá de las especificaciones tanto de resistencias iniciales como finales del H.A.R. Desde este punto de vista el gran desarrollo de nuevos tipos de cementos llevado cabo en los últimos tiempos ha contribuido a la posibilidad de fabricación de estos hormigones.

Uno de los cementos con los que se han conseguido grandes resultados en el campo de H.A.R. es el CEM II /A-S 52,5 N.

La Clase Resistente del cemento utilizado debe ser 52,5 R ó 52,5 N. El empleo de una clase de cemento que proporcione resistencias iniciales mas bajas, dentro de los límites necesarios, se antoja necesario, pues la penalización de las resistencias a edades tempranas se traducirá en una mejora de las resistencias a 28 días.

Especialmente se verá reflejado en un mayor grado de recuperación de las resistencias a partir de los 7 días. Desde este punto de vista tendrá mejor comportamiento un cemento de clase N.

En este sentido señalaremos que como norma general las necesidades en cuanto a resistencias finales unido a las condiciones de curado de los prefabricados (humedad y temperatura) aseguran la consecución de las resistencias a edades tempranas necesarias tanto para el desmoldeo como el manejo de los mismos.

Por otro lado, un cemento con un grado de finura menor, como puede ser un N con respecto a un R, supone una menor superficie específica del mismo lo que se traduce en una menor cantidad de agua necesaria para la realización de la mezcla. Este hecho supone una ventaja añadida para la consecución de una baja relación agua/cemento del H.A.R.

En cuanto a la cantidad de cemento necesaria para la fabricación de H.A.R. depende en gran medida de los factores anteriores así como de las propiedades de los áridos utilizados. Los mejores resultados han sido obtenidos con cantidades entorno a 500 kg./m³.

Se ha observado que mayores contenidos de cemento suponen una caída de las resistencias debido a al incremento de la proporción matriz/áridos, provocando la rotura de las probetas ensayadas por dicha matriz.

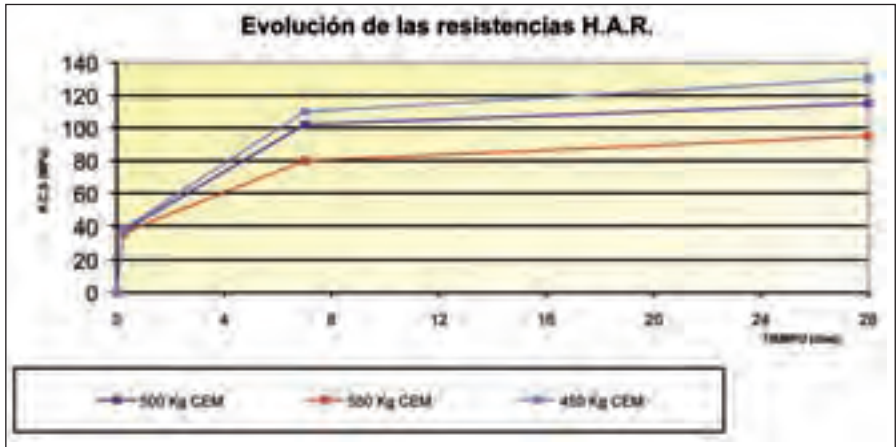


Figura 49.- Relación Resistencia / Contenido Cemento

Adicciones

El empleo de adicciones tipo Humo de Sílice o Sílice Coloidal mejora la compacidad de los H.A.R. al proporcionar un relleno de los huecos de dimensiones micrométricas y nanométricas más eficaz.

Por otro lado, sus reacciones con la cal libre del cemento refuerzan la red cristalina del cemento por medio de la creación de compuestos estables como el silicato cálcico.

La utilización y dosificación de este tipo de productos queda a expensas de la realización de ensayos, pues no en todos los casos se antoja necesario, al suponer un incremento de la proporción de conglomerante de la mezcla, pudiendo ser incluso desaconsejable en algunos casos.

Agua

El agua es un elemento fundamental en la fabricación de H.A.R. Las relaciones agua/cemento necesarias para la consecución de grandes resistencias conllevan un estricto control tanto de las humedades como de las absorciones de los áridos.

Es por ello, que las propiedades de los áridos así como la proporción de sus diferentes fracciones empleadas, tienen una influencia directa en la cantidad de agua de la mezcla.

Para la fabricación de H.A.R. (Resistencias > 100 MPa.) los valores de las relaciones a/c que habrá que conseguir son del entorno de 0,25, incluso mas bajas en ocasiones.

Por otro lado, la consecución de estas bajas relaciones a/c está directamente relacionado con el empleo de adecuados aditivos superplastificantes de última generación grandes reductores de agua, cuya tecnología presentaremos a continuación.

Aditivos Superplastificantes. Tecnología Viscocrete

Los aditivos son un ingrediente imprescindible para el hormigón de altas prestaciones. Mientras el hormigón tradicional se puede fabricar con superplastificantes del tipo naftalensulfonato o melamina sulfonada, los requisitos de un Hormigón de Altas Resistencias necesitan del empleo de aditivos basados en polímeros especiales tipo policarboxilato, como los Viscocrete.

Esta gama de aditivos son los más potentes reductores de agua y tienen excelentes propiedades en cuanto a trabajabilidad, sobre todo a bajas relaciones agua/cemento.

La utilización de estos aditivos, no solo permite obtener las bajas relaciones a/c que hemos comentado con anterioridad, sino que favorece en gran medida la dispersión de las partículas de cemento en la mezcla mejorando la homogeneidad de la misma con las consecuentes ventajas en cuanto a resistencias tanto iniciales como finales.

El gran desarrollo en los últimos tiempos de los aditivos superplastificantes, resultado de la aplicación de la más moderna tecnología en este campo, ha supuesto la incorporación al mercado de la familia de los Policarboxilatos dentro de la cual se engloba la gama Viscocrete.

Esta gama de aditivos superplastificantes permiten la consecución de todos los aspectos que ya hemos resumido con anterioridad, necesarios para la fabricación de H.A.R., a dosificaciones relativamente bajas, lo que supone una ventaja en cuanto al volumen de materiales a manipular. Todo ello, al mismo tiempo, se traduce en mejoras económicas.

Para los H.A.R. se precisa una reducción de agua superior al 30-35%, con el fin de entrar en los parámetros establecidos, por lo que se requieren aditivos basados en la tecnología de los éteres policarboxílicos.

En concreto, para la fabricación de prefabricados de hormigón de Alta Resistencia (dovelas) el empleo del aditivo superplastificante de la gama Viscocrete Sikaviscocrete 20 HE, ha supuesto una revolución tanto por las bajísimas relaciones a/c, y por lo tanto resistencias alcanzadas, como por la facilidad de puesta en obra de los hormigones y del acabado de los prefabricados, consecuencia de la trabajabilidad proporcionada por este aditivo.

Expondremos a continuación en que se basa y como funcionan los aditivos Policarboxílicos de la gama Viscocrete.

Policarboxilatos. Tecnología Viscocrete

Pertencen a la última generación de superplastificantes. Químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico y poseen cadenas laterales, a diferencia de los plastificantes tradicionales (macromolécula tipo peine).

Se alcanza una reducción de agua de hasta el 40% combinado con una manejabilidad controlada y desarrollo de resistencias mecánicas tempranas.



Figura 51.- Estructura de los policarboxilatos y efecto estérico

Los policarboxilatos (copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico) parecen ser los más adecuados para el H.A.R. debido a su mayor efectividad.

Gracias a sus largas cadenas laterales, a diferencia de los plastificantes tradicionales, crean una capa de adsorción de gran volumen alrededor de las partículas de cemento, que impide la floculación y facilita la alta fluidez de la pasta de cemento, condición indispensable para la perfecta puesta en obra de hormigones de consistencia seca.

Los de última generación, aportan una elevada resistencia a la segregación, ya que unen el efecto del impedimento estérico con el de la repulsión electrostática.

Como estos aditivos se basan en moléculas complejas con un alto grado de flexibilidad y comprenden diferentes grupos funcionales y con diferentes longitudes de cadena, las largas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento formados, proporcionando un mayor efecto de dispersión.

Estas cadenas laterales son responsables del efecto estérico e interaccionan con el agua. Al transcurrir el tiempo, una segunda molécula se hace activa mediante el mismo efecto estérico y así se logra una actividad más duradera en el tiempo.

Por este motivo, estas nuevas generaciones de aditivos son especialmente adecuadas para la elaboración de prefabricados tanto con H.A.R. como de hormigones autocompactantes si fuese el caso.

Dicha resistencia a la segregación, consecuencia del efecto estérico y la repulsión electrostática, evita la formación de coqueas en las dovelas permitiendo un óptimo fratasado de la superficie superior de las mismas dentro del molde.

Las diferentes tecnologías o bases de aditivos se utilizan muchas veces en combinación. Los aditivos tradicionales se basan en un efecto de dispersión. La molécula de aditivo tiene una estructura de dipolo con grupos cargados negativamente.

Estas moléculas se adsorben en las partículas de cemento y les dotan así de carga negativa, haciendo que las partículas de cemento se repelan entre sí.

Al pasar el tiempo, progresa la hidratación del cemento y las moléculas de aditivo llegan a cubrirse por los productos de hidratación y entonces deja de haber un efecto de dispersión.

A continuación veremos un ejemplo de aditivo policarboxilato utilizado en la actualidad para la fabricación de dovelas de alta resistencia en la ejecución de los grandes proyectos de túneles, así como en otras en las cuales se precisan prefabricados de estas características: Sikaviscocrete 20 HE.

El empleo de este aditivo superplastificante ha posibilitado en gran medida de ejecución de este tipo de hormigones.

SikaViscocrete 20 HE

Es un aditivo superplastificante de alto rango, diseñado especialmente para su uso en prefabricados. Debido a su excelente comportamiento y elevada eficacia, el Sika Viscocrete 20 HE está especialmente indicado para la fabricación de H.A.R.

Está basado en un nuevo polímero y que junto con una importante optimización de la formulación, le confieren un excelente comportamiento con áridos de diversas naturalezas: calizo, cuarcítico, granítico, etc.

Su formulación, de tipo poli-éter, se basa en largas cadenas de óxido de etileno que proporcionan gran capacidad de dispersión, junto con una corta cadena principal, constituida por pocos grupos de tipo carboxilo, que facilita el desarrollo de la resistencia a edades tempranas.

El elevado número de cadenas de óxido de etileno favorece la resistencia a la segregación. En la siguiente gráfica se indica la influencia de este aditivo en las resistencias iniciales en comparación al empleo de otros superplastificantes. (Poli-éter convencional o Melaminas altas reductoras de agua).

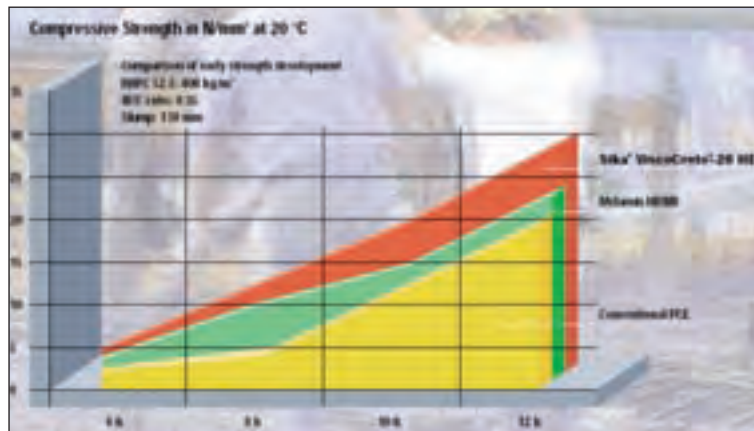


Figura 51.- Comparativo de Resistencias Iniciales

Entre las ventajas de este superplastificante podemos destacar:

- Pronunciada aptitud de compactación
- Reducción muy importante de agua de amasado lo que se traduce en altas resistencias, gran impermeabilidad y gran durabilidad
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la fluencia y retracción
- Proporciona gran resistencia a la carbonatación
- No contienen cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto pueden utilizarse sin restricciones en hormigones armados

Los hormigones con Sika Viscocrete 20 HE son extremadamente cohesivos y no segregan. Ello permite la fabricación de hormigones con alta densidad de armadura.

A pesar de que el hormigón elaborado con Sika Viscocrete tiene muy baja relación agua/cemento, presenta una fuerte cohesión interna y está dotado de excelente trabajabilidad.

Caso Práctico: Empleo de la Tecnología Viscocrete en dovelas

Con este ejemplo se muestran dos propuestas de dosificación de H.A.R. diseñados para la fabricación de dovelas prefabricadas, con distintos tipos de áridos y adicciones así como los resultados de Resistencia a Compresión Simple obtenidas. En ambos casos se empleará el aditivo superplastificante Sikaviscocrete 20 HE.



Figura 52.- Gráfico % VC 20 HE/Reducción agua

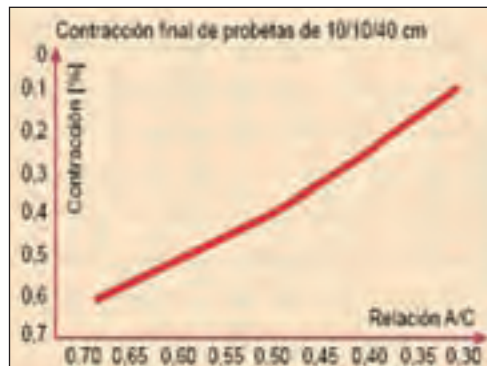


Figura 53.- Contracción / Relación a/c

a) H.A.R. con cuarcitas HA-110

Materiales: Se emplean en este caso dos fracciones de áridos cuarcíticos (arena 0/4 y gravín 4/10), respetando siempre el tamaño máx. árido (12 mm).

Se utilizará asimismo cemento CEM II/A-S 52,5 N. En este caso no se precisa el empleo de adicciones para la consecución de altas resistencias como veremos a continuación.

Dosificación por m³ y Resistencias obtenidas

Dosificación por Metro Cúbico

COMPONENTES		Kilos	Litros
Cemento	CEM II/AS 52.5 N	490,00	158,06
Arena 0/4	53%	998,00	391,19
Gravín 4/10	47%	885,00	346,51
SikaViscocrete 20 HE	2,5 %	12,25	11,24
Agua	a/c =0,24	118,00	118,00
Total		2503,25	1025,00
		7 Días	28 Días
Resistencias compresion (MPa)		110,4	126,80

Se han obtenido valores máximos en probeta cilíndrica 15x30 de **135 MPa** empleando dosificaciones de este tipo. Las variaciones que se puedan presentar, en cuanto a resistencias se refieren, son debidas a las pequeñas diferencias de homogeneidad de los áridos las cuales resultan críticas cuando se están fabricando hormigones de esta índole.

b) H.A.R. con ofitas HA-110

Materiales: Se utilizarán en este caso dos fracciones de ofitas (arena 0/4 y gravín 4/12). Se empleará asimismo cemento CEM II/A-S 52,5 N. En este caso se precisa el empleo de adicción de Humo de Sílice en polvo para la consecución de altas resistencias.

Dosificación por m³ y Resistencias obtenidas

Dosificación por Metro Cúbico

COMPONENTES		Kilos	Litros
Cemento	CEM II/AS 52.5 N	490,00	158,06
Arena 0/4	55%	1067,00	394,71
Gravín 4/12	45%	873,00	323,09
SikaFume S92D	5%	24,50	11,14
SikaViscocrete 20 HE	1,9 %	9,78	9,00
Agua	a/c =0,25	129,00	129,00
Total		2593,28	1025,00
		7 Días	28 Días
Resistencias compresion (MPa)		108,9	122,80

Se han utilizado también en combinación arenas silíceas con gravín ofítico o cuarcítico logrando resultados de resistencias por encima de los 120 MPa. De este modo por un lado se consigue optimizar la compacidad del hormigón por medios de las arenas silíceas y combinarlas con áridos de gran resistencia a compresión como son las ofitas.

Conclusiones del caso práctico H.A.R.

Una vez conseguidas las Resistencias a Compresión Simple deseadas a edades largas de los H.A.R., conviene tener en cuenta los siguientes aspectos básicos cuando se fabrican dovelas TBM de estas características:

En primer lugar deben asegurarse resistencias a edades tempranas suficientemente grandes como para poder desmoldar los prefabricados en un tiempo acorde con una óptima producción. Como norma general suele exigirse 15 MPa para proceder a tal operación.

En el caso de H.A.R., consecuencia de las exigencias a edades largas, no suele haber problema alguno en este aspecto, llegando en ocasiones a obtener resistencias superiores a 50 MPa a las 6 horas de fabricación.

Por otro lado, debe asegurarse un total llenado de los moldes y en un tiempo apropiado a una buena producción. Una buena manejabilidad del hormigón se traduce en una correcta puesta en obra con la consiguiente reducción de vibrado de los moldes. Esto supone un menor desgaste de los vibradores así como una reducción del ruido originado en esta operación y un menor consumo energético.

En los H.A.R. expuestos con anterioridad, estos aspectos han sido tenidos muy en cuenta a la hora de su diseño, eligiendo el aditivo superplastificante que combinase la consecución de las altas resistencias con su correcta puesta en obra.

La óptima manejabilidad debe estar en consonancia con las consistencias secas requeridas en los H.A.R. En los casos que aquí se exponen se consiguieron muy buenas manejabilidades con consistencias dadas por el Cono de Abrams entorno a 2 cm.

Por último, la consecución de este tipo de hormigones depende en todo momento del control exhaustivo de humedades, absorciones y posibles variaciones granulométricas en los áridos, así como del control de calidades de cemento, agua, aditivos y adiciones utilizados.

8.3.4 Mortero de inyección de trasdos

Tras la excavación y colocación de los anillos de dovelas en los túneles excavados con máquinas TBM es habitual el relleno del trasdós de las dovelas, entre éstas y el suelo o roca excavada, con un mortero bombeado de relleno aunque también puede rellenarse con grava o se procede a una solución mixta de mortero y grava por secciones.



Foto 31.- Mortero de relleno tras su fabricación

El mortero en cuestión debe reunir una serie de características, consecuencia de las particularidades de su puesta en obra que iremos describiendo a continuación junto con algún ejemplo práctico.

Las principales características que debe reunir son las siguientes:

Resistencia característica suficiente como para asegurar unas mínimas propiedades mecánicas, cuyas especificaciones suelen estar del orden de

10-15 MPa.

Para asegurar las resistencias se utilizan aditivos plastificantes y superplastificantes que permitan la consecución de adecuadas relaciones a/c así como la optimización de la cantidad de cemento en la mezcla para conseguir las citadas resistencias.

Algunos ejemplos de plastificantes empleados son **Sikament 185**, **Sikament 390** y de superplastificantes **Sikatard 203** que realiza a su vez la función de agente estabilizador.

Resistencias iniciales suficientes que permitan a la máquina tuneladora continuar su avance sin que los últimos anillos colocados próximos al escudo puedan sufrir algún movimiento.

En determinadas ocasiones pueden emplearse acelerantes de fraguado que se mezclan con el mortero en la boquilla de inyección. Suelen emplearse acelerantes tipo silicato en dosificaciones entorno a 4% del conglomerante (cemento + cenizas) que producen tiempos de inicio de fraguado alrededor de 15 min tras su aplicación permitiendo que el mortero pueda fluir a lo largo del trasdós del anillo asegurando un completo llenado del mismo.

Por otro lado el empleo de acelerantes permite que se pueda verter el mortero con mayor proximidad al escudo al incrementarse la pendiente de la recta formada el punto de inyección del mortero y la intersección del mortero con los cepillos de cola de la máquina tuneladora.

El incremento de dicha pendiente evita que el mortero pueda salir a través del escudo permitiendo una reducción de consumo a su vez de grasa impermeabilizante de los cepillos de cola.

Se emplean acelerantes silicato tipo **Sigunita L 65**. También se emplean acelerantes libres de álcali tipo **Sigunita L 53 AFS** o **Sigunita L 72** en dosificaciones menores del 3% con la ventaja con respecto a los silicatos en que la penalización de resistencias características del mortero son mucho menores, del orden del 20% de penalización con respecto a la que producen los silicatos.

- El mortero debe de tener un **tiempo de manejabilidad** suficiente que permita el mantenimiento de su fluidez desde el momento de su fabricación hasta su momento de puesta en obra permitiendo un óptimo bombeo y un correcto llenado del trasdós.

Hay que tener en cuenta que habitualmente los proyectos ejecutados con máquinas TBM y que requieren este tipo de mortero de relleno son proyectos de túneles de gran longitud por lo que el tiempo necesario para introducir el mortero fabricado desde el exterior hasta la tuneladora puede ser de más de una hora cuando el frente de excavación se encuentra a largas distancias del emboquille de túnel.

A este tiempo hay que sumar las esperas entre maniobras de entrada y salida, posibles paradas eventuales de la máquina tuneladora y trasvases del mortero desde el tren hasta la máquina tuneladora.

Este tiempo en ocasiones puede sobrepasar las 4 horas. Con este propósito se emplean aditivos estabilizadores de fraguado tipo **Sikatard 930** y **Sikatard 203**.

Desde este punto debe tenerse en cuenta que la mezcla debe de partir con un diámetro de 200 mm aproximadamente en la Mesa de Sacudidas para mantener a través del tiempo un diámetro no menor de 100 mm. Si el diámetro cae por debajo de este último valor los problemas de bombeo ya pueden ser significativos.

Una de las características más importantes que debe reunir este tipo de morteros es poseer determinada cantidad de aire ocluido. Este hecho es debido a dos características que reúne el trabajo de su puesta en obra:

- **Distancia de bombeo.** La distancia de bombeo desde la tolva (secatol) con la cual se transporta hasta el interior del túnel hasta el punto de inyección cerca del escudo puede

estar en ocasiones por encima de lo 100 m, con la consiguiente distancia de tuberías y mangueras las cuales se encuentran llenas de mortero durante el bombeo.

- **Paradas en la producción.** A lo largo del proceso de excavación se producen habituales paradas más o menos prolongadas en el tiempo y por causas muy diversas. Durante estas paradas en muchos casos se interrumpe el bombeo del mortero quedando las tuberías y mangueras llenas de mortero sin movimiento.

Debido a las características anteriores y ayudado por las altas temperaturas que generalmente tiene la zona de trabajo dentro de la máquina TBM, durante las paradas comentadas anteriormente se puede producir un falso fraguado del mortero en forma de apelmazamiento del mismo al no estar parado dentro de tuberías u mangueras.

Si este se produce en el momento de reiniciar el bombeo del mortero será preciso grandes presiones para desplazar la mezcla e incluso su imposibilidad con el consiguiente trabajo de limpieza y desmonte de la instalación. Esta es la razón del contenido de aire imprescindible, ralentizando el proceso de falso fraguado y facilitando su bombeo.

Hay que reseñar que la inclusión de aire en el mortero penalizará las resistencias características del mismo debiéndose buscar el punto de equilibrio entre aire ocluido y resistencias. En ocasiones el contenido de aire ocluido puede estar próximo al 20% aunque habitualmente los valores suelen estar entorno a un 10%.

Esta variación depende principalmente de la granulometría de los áridos que forman el mortero, con principal importancia del contenido de finos de las arenas.

Se emplean aditivos aireantes con el fin de incrementar el contenido de aire tipo **Sikanol M**.

Otro problema al que hay que enfrentarse habitualmente a la hora de diseñar el mortero es la **resistencia al lavado** del mismo cuando hay abundante afluencia de agua desde el terreno excavado. Para mejorar esta propiedad pueden emplearse acelerantes de fraguado o aditivos tixotropantes tipo **Sikathixo TBM** o los acelerantes comentados en el apartado anterior.

Caso practico de dosificacion para mortero de trasdos

En primer lugar se define las características mas comunes de los materiales empleados para la realización de este tipo de morteros, posteriormente se definen los criterios de dosificación y finalmente se presentará una dosificación estandar.

Áridos

En la mayoría de los casos en los que es necesaria la fabricación de este tipo de morteros se precisará de la mezcla de dos tipos de arenas, una que aporte las fracciones granulométricas mas altas, con tamaños hasta 6-8 mm y otra que aporte los finos necesarios para asegurar un adecuado bombeo y evite el efecto de falso fraguado que se ha explicado con anterioridad.

En el ejemplo que expondremos partiremos de una mezcla de áridos de naturaleza caliza y silicea con las siguientes granulometrías:

Granulometrias % de pase

TAMIZ UNE	8	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063
ARENA SILICEA	100,00	96,60	84,40	72,10	54,30	26,50	10,40	3,20
ARENA CALIZA	100,00	97,70	82,10	64,20	41,60	32,70	25,00	17,60

Tabla 17.- Granulometría del los áridos empleados en el mortero

A continuación, se buscará al porcentaje óptimo de cada fracción cuya mezcla granulométrica se ajuste a huso UNE 933-2-96. En este caso con una mezcla del 40% de arena Silicea y un 60% de arena caliza la curva granulométrica es la que sigue.

El contenido de finos de la mezcla resultante se considera apropiado para asegurar una mezcla homogénea evitando segregaciones en la misma.

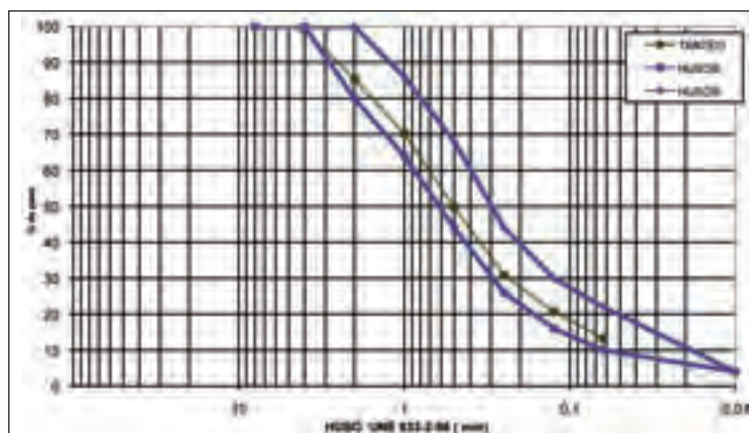


Figura 54.- Curva resultante de la mezcla de áridos

Cementos y adiciones

Habitualmente se emplean cementos considerados no rápidos en cuanto a tiempos de fraguado y endurecimiento se refiere con el fin de favorecer una manejabilidad adecuada a lo largo del tiempo desde su fabricación hasta su puesta en obra. Por esta razón suelen emplearse cementos tipo II, III o IV tanto de clase A y B y clase resistente 42,5 y 32,5.

Se suelen emplear cenizas volantes o filler calizo para asegurar un contenido de finos de la mezcla adecuado sustituyendo éstos a parte del cemento por razones económicas.

Debido a los relativamente bajos requerimientos en cuanto a Resistencias Características se refiere, las cantidades de cemento suelen estar entre 100 y 200 kg, compensando las adiciones la restante cantidad de conglomerante necesario para la fabricación del mortero. En este caso particular, se ha utilizado un cemento CEM II A/V 42,5 R.

Aditivos

Para asegurar las distintas propiedades descritas con anterioridad se suelen emplear 3 tipos de aditivos durante la fabricación de la mezcla y otros para su aplicación sobre la misma una vez fabricada la misma (acelerantes, tixotropantes, etc). Durante el proceso de fabricación se emplea:

- Aditivo plastificante o superplastificante, reductor de agua. En el caso **Sikament 185**
- Aditivo aireante que asegure el contenido de aire ocluido requerido. En el caso **Sikanol M**
- Aditivo estabilizador de fraguado para mantener la manejabilidad el tiempo necesario desde la fabricación hasta la puesta en obra. En el caso **Sikatard 203**

Posteriormente se adiciónarán productos para conferir a mortero otras propiedades como acelerantes de fraguado o tixotropantes.

Una vez analizadas las diferentes características de los materiales y definidos los parámetros para la fabricación del mortero se obtiene la siguiente dosificación en kg.

ARENA SILICEA	40%	612,8
ARENA CALIZA	60%	925,7
AGUA	a/c= 0,70	175
CEMENTO II A / V 42,5 R		150
CENIZAS		100
SIKANOL M	1 %	2,5
SIKAMENT 390	0,8 %	1,7
SIKATARD 203	0,5%	1,25

Tabla 18.- Propuesta de dosificación de mortero

Una vez fabricado el mortero se obtienen los siguientes resultados:

- La consistencia inicial corresponde e un diámetro de 195 mm en la Mesa de Sacudidas.
- La mezcla está realizada para una manejabilidad esperada de 4 horas. La consistencia al cabo de este tiempo es de 150 mm en la Mesa de Sacudidas.
- El contenido de aire inicial es de un 15%.
- La resistencia característica a 28 días es de 13 MPa.
- La bombeabilidad del mortero se considera óptima con presiones de bombeo por debajo de los 50 bar.

8.3.5 Espumas para maquinas tuneladoras

Cada vez se ha extendido en mayor medida la utilización de los llamados agentes espumógenos en los trabajos con máquinas tuneladoras TBM.

La función principal de este tipo de espumas tensoactivas es mezclarse con el terreno excavado, para darle cohesión y plasticidad facilitando el transporte del material de excavación a través de las cintas transportadoras hacia el exterior.

Con el empleo de este tipo de productos se reduce en gran medida la cantidad de polvo formada durante la excavación así como se prolonga la vida útil de los cortadores.

Además de todas las ventajas anteriores, si cabe la más importante es el ahorro energético que supone empleo de las espumas por reducción del torque de la cabeza de corte durante la excavación del suelo o roca.

Las espumas de inyección se añaden en la cabeza de corte de la tuneladora mezcladas con aire y agua mediante un sistema generador de espumas, permitiendo un mejor transporte

del terreno, una menor adherencia sobre la cinta transportadora, a la vez que se reduce en gran medida la pegajosidad del material.

En primer lugar a la hora de utilizar este tipo de espumógenos se deberá realizar un estudio serio referente a los siguientes parámetros:

- Litología del terreno
- Abrasividad del terreno
- Límite de Atterberg
- Condiciones de torques iniciales
- Características mecánicas del terreno
- Coeficiente de impermeabilidad del terreno

Bajo estos condicionantes, se deberá elegir la espuma más idónea que se acople a las exigencias iniciales.

Desde este punto de vista el simulador de tuneladoras **OSCAR (Optimized Soil Conditioning Additive Reactor)** supone una innovación en el campo de la obra subterránea, ya que hasta la actualidad no existen elementos de control sobre las propiedades que adquiere un terreno al adicionarle un agente espumógeno para mejorar sus características.

En adelante se explicará su funcionamiento y se analizará un ejemplo práctico real comparando los parámetros con los obtenidos en el simulador **OSCAR**.

Una vez elegido el agente espumógeno óptimo, se podrán establecer unos parámetros de trabajo iniciales que deberán aplicarse durante la ejecución en la obra. Estos parámetros fundamentales serán:

- **Concentración de espuma:** Se define con la fórmula siguiente:

$$C=100 \frac{\text{Vol. de espumante}}{\text{Vol. de solución}}$$

- **Factor de expansión (Foam Expansion Ratio FER):** Se define con la fórmula siguiente:

$$T_{\text{exp}}=100 \frac{\text{Vol. de aire}}{\text{Vol. de solución}}$$

- **Factor de inyección o tasa de tratamiento (Foam Injection Ratio):** Se define con la fórmula siguiente:

$$T_{\text{trat}}=100 \frac{\text{Vol. de espuma}}{\text{Vol. de terreno}}$$

Tanto la concentración de espuma como el factor de expansión acostumbran a ser 2 factores con un grado de variabilidad pequeño. Normalmente el operador de la tuneladora suele fijar unos parámetros iniciales, alterando los porcentajes en función de la presión del terreno.

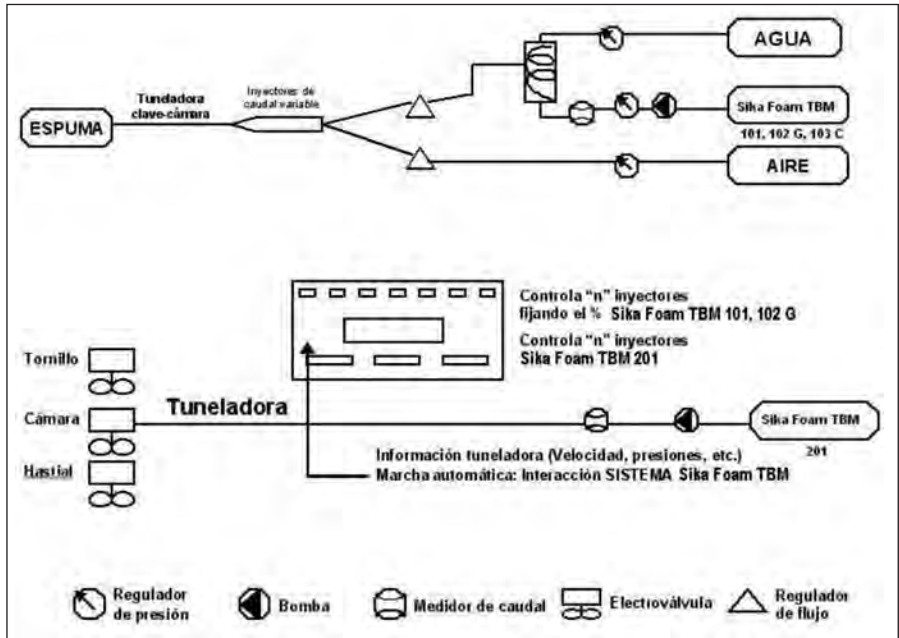


Figura 55.- Esquema de dosificación de espumas

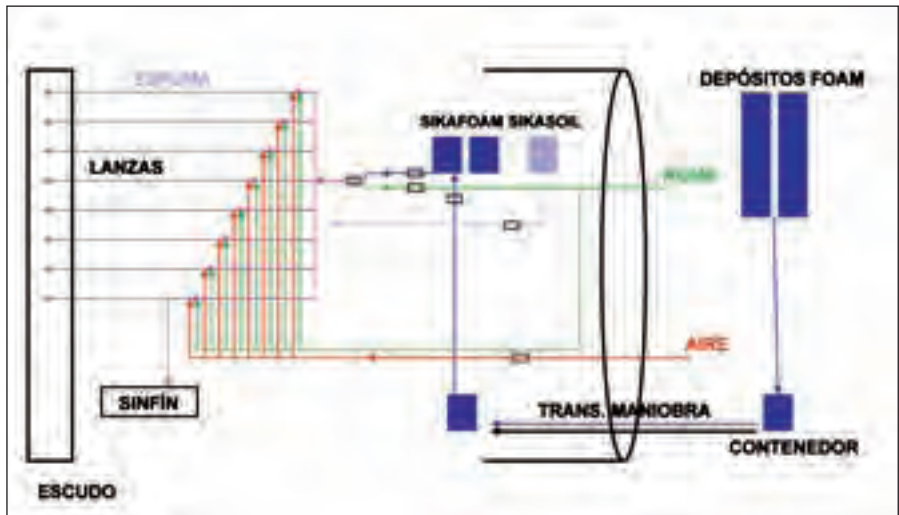


Figura 56.- Esquema de dosificación en TBM

Productos de la gama Sika TBM

La gama de Sika en espumas de inyección se compone de los siguientes productos:

Agentes espumogenos

- **Sika TBM FOAM 101:** Espumógeno tensoactivo universal para excavaciones con máquina TBM, tanto tipo EPB, Mix Shield, Escudo abierto o microtuneladoras. Espumogeno generador de suelo plástico, antiabrasión y antipolvo. Su empleo supone una reducción del consumo energético de la máquina durante la excavación y extracción del suelo.
- **Sika TBM FOAM 102 G:** Espumógeno tensoactivo específicamente indicado para su utilización en terrenos yesíferos, generador de suelo plástico, antiabrasión y antipolvo. Su empleo supone una reducción del consumo energético de la máquina durante la excavación y extracción del suelo.
- **Sika TBM FOAM 103 C:** Espumógeno tensoactivo específicamente indicado para su utilización en terrenos arcillosos. En la mayoría de los casos se emplea conjuntamente con el agente desestructurante Sika Soil TBM pues permite que el agente espumógeno tenga una adecuada dispersión sobre las partículas de arcilla, facilitando la acción cohesionadota de la espuma. Su empleo supone una reducción del consumo energético de la máquina durante la excavación y extracción del suelo.

Agente desestructurante (polimero)

- **Sika TBM SOIL:** Agente desestructurante para terrenos arcillosos bajo las condiciones de presión y temperatura existentes en la cabeza de corte de la máquina tuneladora. Su principal función práctica es evitar la formación de grandes bloques arcillosos consecuencia de las altas temperaturas facilitando la extracción del suelo arcilloso a través del escudo, del sinfín y de la cinta transportadora. Su empleo supone una reducción del consumo energético de la máquina durante la excavación y extracción del suelo.

Agente antiabrasion

- **Sika TBM CUT 10:** Agente antiabrasión de las cabezas de corte reductor del desgaste de los elementos de corte (cortadores y picas) de la cabeza. Al igual que los agentes espumógenos su empleo supone una reducción del consumo energético de la máquina durante la excavación y extracción del suelo o roca.

Polimero retenedor de agua

- **Sika FOAM TBM 201:** Polímero retenedor de agua y agente espumógeno especialmente indicado para la extracción de suelos con gran presencia de agua dándole cohesión a la mezcla de suelo y agua favoreciendo su extracción a través de la cinta transportadora.

Agente antiespumogeno

- **Sika TBM BIO 100:** Agente antiespumógeno para el tratamiento de materiales extraídos en máquinas tuneladoras TBM. Elimina las espumas mezcladas con el suelo permitiendo a éste adquirir las propiedades iniciales antes de la aplicación de las espumas.

De este modo se favorece su transporte y posterior vertido y colocación en los vertederos confiriéndole las propiedades mecánicas iniciales que eviten desmoronamientos y corrimientos de tierra de los mismos.

Este aspecto tiene especial importancia cuando se trata de suelos arcillosos.

Agente espumogeno desestructurante

- **Sika TBM SOIL F:** Agente espumógeno y desestructurante para terrenos arcillosos especialmente indicado para aquellos casos en los que se precise aplicación de espumógeno y desestructurante a través de una sola línea en la máquina tuneladora.

Agente generador de suelo plástico, antiabrasión y antipolvo. Evita la formación de bloques de arcilla por efecto de las altas temperaturas favoreciendo la extracción del suelo excavado.

8.3.6 Simulador de TBM O.S.C.A.R.

El simulador de TBM OSCAR es un desarrollo cuyo fin es ensayar diferentes tipos de suelos estableciendo una serie de parámetros de referencia en cuanto a dosificaciones de agentes espumógenos, polímeros y desestructurantes se refiere, de manera que estos parámetros se apliquen posteriormente a las condiciones reales de trabajo de las máquinas tuneladoras.

El simulador OSCAR permite ensayar todo tipo de suelos (arenas, yesos, arcillas, etc) obteniendo los valores óptimos de concentración de agente espumógeno, Foam Expansion Ratio FER, Foam Injection Ratio FIR seleccionando el agente o mezcla mas adecuados en cada caso.

Por otro lado, aporta otra serie de valores de temperatura en el reactor, variaciones del torque y presiones de trabajo de los cuales se sacan conclusiones en de ahorro de consumo energético y características reológicas como consistencia y cohesión. A continuación, se muestran las diferentes partes del simulador OSCAR.



Foto 32.- Vista general del Simulador de TBM OSCAR

Los principales componentes de la máquina son los siguientes (La numeración corresponde a los diferentes elementos numerados en la foto anterior)

1. Cámara de mezclado y presurización
2. Cierre mecanizado
- 3,4 Válvulas

5. Sinfín para extracción de material
6. Circuito regulador de alta presión
7. Panel de control



Foto 33.- Detalle de la cámara de mezclado y componentes

1. Palas giratorias
2. Inyectores de espuma y sonda de temperatura
3. Eje de rotación vertical
- 4,5,6. Salidas de material de la cámara de mezclado



Foto 34.- Detalle del sinfín de extracción

1. Sinfín
2. Motor eléctrico
3. Válvula de apertura comunicada con la cámara de mezclado
4. Válvula
5. Sensor de presión de tierras

Procedimiento de ensayo en OSCAR

El procedimiento de ensayo en líneas generales es el siguiente:

- Recogida y análisis granulométrico de los tipos de suelos objeto de análisis.
- Saturación de cada suelo para trabajar en condiciones reales y con el fin de establecer un punto de partida igual para cada tipo de suelo, de manera que los resultados obtenidos sean comparables según las mismas condiciones.
- Introducción de cada suelo en el reactor OSCAR y presurización de la cámara. Habitualmente cada ensayo se realiza con una muestra de 20 Kg de suelo por razones obvias de volumen del reactor. La presión de trabajo para los ensayos será la misma que la empleada durante la excavación y será facilitada por el constructor.
- Homogenización de la mezcla en el reactor a través de palas giratorias de mezclado durante 15 min.
- El panel de mandos del OSCAR registra una serie de parámetros (par de giro de las palas del interior del reactor-torque-, temperatura de la mezcla,...) cuyos valores en esta fase del experimento en la que todavía no se ha procedido a la introducción de los distintos agentes espumógenos son la referencia para analizar sus variaciones en fases posteriores, compararlas y obtener resultados.
- Tras estos primeros 15 min se procede a adición de la solución de agente espumógeno en el reactor. Adición de producto espumógeno de Sika es introducido en la cámara a través de un Venturi que vence la presión interior.
- Tras la adición de la solución se procede al registro de los parámetros anteriores bajo las condiciones de mezcla de la espuma y el suelo. Estos parámetros serán comparados con los valores iniciales sacando conclusiones en cuanto a reducción de torque que implica reducción de consumo energético, reducción de temperatura, etc.
- Tras otros 15 minutos se procede a la extracción de muestras del material resultante a través de válvulas dosapro y baroid.
- Con estas muestras se realizan una serie de ensayos externos a OSCAR que nos definen las características del nuevo terreno respecto al inicial.

A partir de la repetición de este protocolo de ensayos se van sacando conclusiones sobre tipo de espuma y dosificación necesarias para cada tipo de suelo característico, así como la implementación y mejora de las propias características de las espumas.

Caso practico de aplicación de productos de la gama sika tbm en un tunel excavado con TBM

A continuación, se analizará un caso real de una obra de túnel excavada con TBM en la cual la mayor parte del suelo a excavar es de naturaleza arcillosa. Se realizará una comparativa de los valores obtenidos de los diferentes parámetros en el laboratorio y los valores reales obtenidos en la máquina TBM.

En primer lugar se deben definir los parámetros de trabajo:

- Presión de trabajo. En este caso en particular se ha trabajado a Presión Atmosférica
- Elección de agentes espumógenos. En el caso en particular debido a la naturaleza arcillosa del suelo se opta por emplear el espumógeno Sika TBM Foam 103 C y el agente desestructurante Sika TBM Soil.
- Tamaño de la muestra. Se han empleado para cada ensayo 20 kg de suelo facilitado por la obra.
- Determinación del agua de saturación necesaria con el fin de que todos los ensayos se realicen en las mismas condiciones de humedad y lo mas parecidas posibles a la situación real del suelo durante su excavación y extracción. En este caso han sido necesario 5 l de agua para saturación total de la muestra de 20 kg.
- Tamizado de la muestra. A partir de la muestra enviada al laboratorio desde la excavación de la obra, se ha realizado una criba para adecuar el tamaño del suelo a las dimensiones admisibles de trabajo del reactor. Al tratarse de un suelo arcilloso, el tamaño máximo de grano no ha sido crítico.

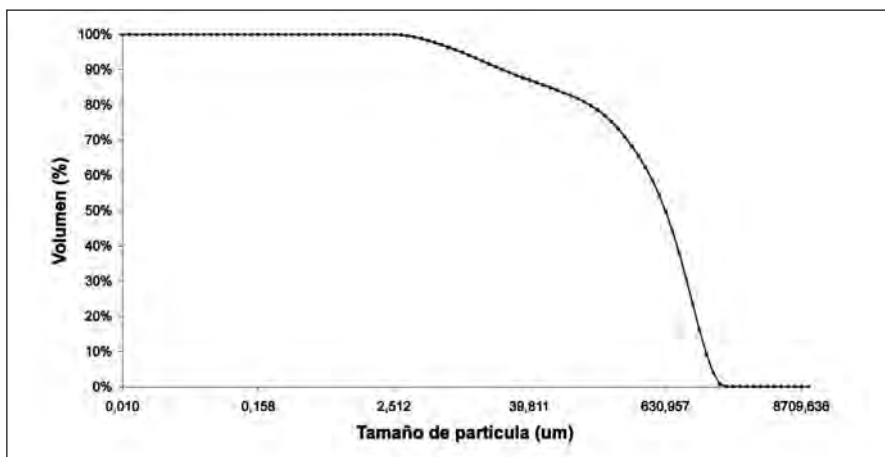


Figura 57.- Distribución granulométrica de la muestra

Una vez definidos los parámetros se realizan una serie de ensayos a distintas concentraciones de agente espumógeno Sika TBM Foam 103 C, desestructurante Sika TBM Soil y a diferentes tasas de inyección FIR.

Se fija una tasa de expansión FER = 8, pues hay que fijar un parámetro al menos para sacar conclusiones comparativas. La tasa de expansión FER = 8 es un valor habitual de trabajo con este tipo de suelo en condiciones de saturación.

Los diferentes ensayos realizados se muestran en la siguiente tabla.

Aditivo	FIR	Concentración Sika Foam 103
SOLO ESPUMA	40%	2%
SIKA SOIL TBM 0,1%	30%	1%
SIKA SOIL TBM 0,1%	30%	2%
SIKA SOIL TBM 0,1%	40%	1%
SIKA SOIL TBM 0,1%	40%	2%
SIKA SOIL TBM 0,2%	30%	1%
SIKA SOIL TBM 0,2%	30%	2%
SIKA SOIL TBM 0,2%	40%	1%
SIKA SOIL TBM 0,2%	40%	2%
SIKA SOIL TBM 0,3%	30%	1%
SIKA SOIL TBM 0,3%	30%	2%
SIKA SOIL TBM 0,3%	40%	1%
SIKA SOIL TBM 0,3%	40%	2%
SIKA SOIL TBM 0,4%	30%	1%
SIKA SOIL TBM 0,4%	30%	2%
SIKA SOIL TBM 0,4%	40%	1%
SIKA SOIL TBM 0,4%	40%	2%

Tabla 19.- Relación de ensayos realizados

Determinación de los parámetros óptimos de trabajo.

Una vez realizados los diferentes ensayos y medidos sus parámetros se procede a la elección de la dosificación de espumógeno, desestructurante, así como de espuma más adecuados.

En primer lugar se analiza la variación de torque de cada ensayo y su variación a las diferentes dosificaciones. En este caso la variación de la dosificación óptima es la siguiente. Se observa una caída media de 5,30 N.m a 0,75 N.m.

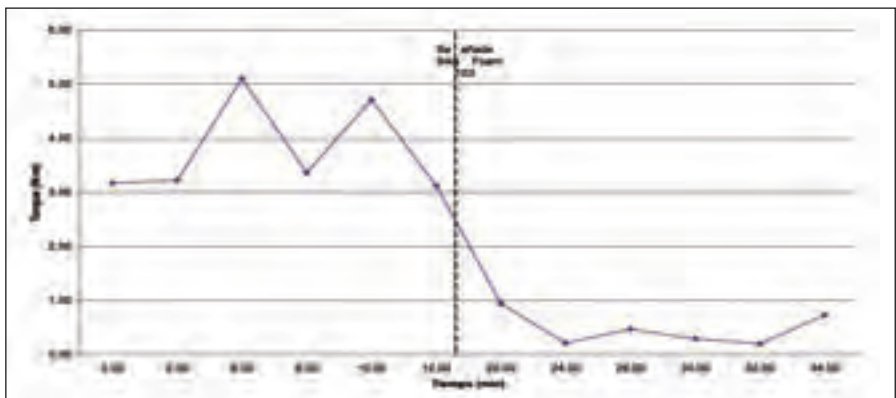


Figura 58.- Registro de la variación del torque

El resto de parámetros medidos para la dosificación óptima son:

Densidad

Densidad (g/cm ³)	
Sin Sika Foam 103	Con Sika Foam 103
1,7	1,3

Slump Test

Slump Test (cm)	
Sin Sika Foam 103	Con Sika Foam 103
0	0,9



Foto 35.- Slump test sin y con Sika TBM Foam 103 y Sika TBM Soil

Mesa de sacudidas

Diámetro (cm)	
Sin Sika Foam 103	Con Sika Foam 103
10	13,5



Foto 36.- Ensayo mesa de sacudidas sin/con Sika TBM Foam 103 y Sika TBM Soil

Ángulo de adhesión en cinta

Ángulo de adhesión (°)	
Sin Sika Foam 103	Con Sika Foam 103
60	25



Foto 37.- Ensayo adhesión en cinta sin/con Sika TBM Foam 103 y Sika TBM Soil

Todos estos ensayos anteriores se han realizado para cada una de las distintas combinaciones determinándose que la dosificación óptima será la siguiente.

Desestructurante	FER	FIR	Concentración Sika Foam 103 C
SIKA SOIL TBM 0,4%	8	40%	2%

Aplicación de los parametros a condiciones reales en obra

Los datos anteriores se llevan a su aplicación práctica en la máquina TBM cuyas condiciones de excavación son las siguientes:

- Velocidad de avance media 50 mm/min. Implica 3,45 m³/min de suelo excavado (o 207 m³/h)
- Con estos valores se calcula el caudal de espuma necesario según el FIR calculado de 40. Se obtiene un caudal de espuma de 138 l/min.
- Una vez determinado el caudal necesario se procede a la regulación de la tasa de expansión FER = 8. Habitualmente en las máquinas TBM se trabaja a caudal de agua constante, variando por tanto la cantidad de aire en el generador de espuma para obtener la tasa de expansión deseada en cada momento.
- Se fijan los caudales de agente espumógeno Sika TBM Foam 103 C en el 2% de disolución y desestructurante Sika TBM Soil 0,4% sobre m³ de suelo excavado en el panel de control.
- Se procede al control de temperatura y par de la cabeza de corte analizando sus variaciones en función de los diferentes caudales de espuma a través de la lanzas del escudo. Con este análisis se encontrará el punto óptimo que suponga un menor consumo energético en la máquina tuneladora

Todos los parámetros obtenidos en el simulador **OSCAR**, se relacionarán con los reales en producción obtenidos directamente en la TBM mediante un factor de escala experimental denominado **Gp**.

9 TENDENCIAS, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Sika es una empresa internacional fundada en el año 1910 en Suiza que trabaja en España desde hace más de 50 años, por lo que podemos decir que conocemos las tendencias y el mercado.

Dentro de nuestro **Departamento I+D+i**, tenemos como principios tanto el desarrollo sostenible, como el impluso de la innovación y las sinergias con nuestros colaboradores, ya que los centros de investigación son el motor de los nuevos productos. Por lo tanto sabemos a dónde vamos, por qué queremos ir allí y cómo lo haremos.

Hoy en día tenemos **soluciones integradas** dedicadas al sellado, pegado, a la impermeabilización, protección y resistencia del hormigón, las cuales las dividimos en gamas de productos tecnológicos como de Sellados y Adhesivos, Pavimentos y Pinturas, Aditivos de hormigón y Morteros, Reparación y Protección, y Refuerzos y Acústica.



Sin embargo en un futuro próximo trataremos de aprovechar las tendencias globales del mercado con materiales inteligentes, teniendo en cuenta el ratio altas prestaciones/coste unitario, desarrollando soluciones que sean rápidas y fáciles, amigas del Medio Ambiente, flexibles y modulares, y de aplicación universal.

De este futuro se deriva la necesidad de impulsar nuestro Departamento de I+D+i, **enfocado hacia el cliente**, proporcionándole un servicio completo con soluciones tecnológicas en todas las etapas de un Proyecto, desde su idea inicial hasta en el final cuando es ejecutado.

Tenemos una **actualización continua** de productos y nuevas tecnologías a través de las colaboraciones con los centros de investigación, reduciendo la complejidad de los procesos, de los productos y de los servicios, para optimizar y obtener los más altos rendimientos en su empleo.

Es importante realizar **desarrollos a corto y a medio plazo**, con el fin de crear una mayor seguridad medioambiental. Esto supone una serie de adaptaciones de los nuevos desarrollos con el objeto de dar respuestas a tiempo, y con los productos más adecuados.

Hay consideraciones de ubicación y de coste de materias primas, es decir, nos acercamos en los procesos de producción, de logística y de la manipulación y el transporte, con un respeto al Medio Ambiente durante todo el proceso.

Por eso, nuestros productos y conceptos generales van enfocados hacia una gran facilidad en el uso, a la flexibilidad de adaptación frente a la aplicación especializada, y al concepto modular, que está por encima de consideraciones locales.

La tendencia en los **próximos 20 años** es de conseguir materiales ligeros, fáciles de transportar, que se adapten a requerimientos varios, incluso de elevado comportamiento.



Foto 39.- Sika apuesta por una mejora constante en I+D+i

Es importante que estos materiales sean universales, que traspasen fronteras y que se adapten a las costumbres y usos de cada región. Los **materiales inteligentes** son el resultado de una clara innovación tecnológica, son diseños moleculares, autosuficientes, y que se pueden crear en un breve plazo.

La creación de programas amplios de I+D+i permiten una mayor **competitividad** para las compañías, una base tecnológica sostenible para la creación de nuevos productos y una explotación de estos resultados.

Los motores de I+D son los Centros Públicos, el **motor del mercado** son las empresas, y este ciclo, a su vez recae en la investigación y desarrollo, que revierte otra vez sobre el propio mercado.

Todo este proceso permite el avance de la tecnología y la aplicación de la misma evitando desfases muy comunes entre los logros y su aplicación real (Ejemplo: SCC o acelerantes libres de álcali). En definitiva asegura su **implantación**.

Un ejemplo de todo esto es un edificio de 250 metros de altura en Roppongi Hills, Tokio, donde la velocidad de construcción de abril a diciembre fue importante, gracias a la utilización de una tecnología de quinta generación de superplastificantes de hormigón y hormigones SCC.

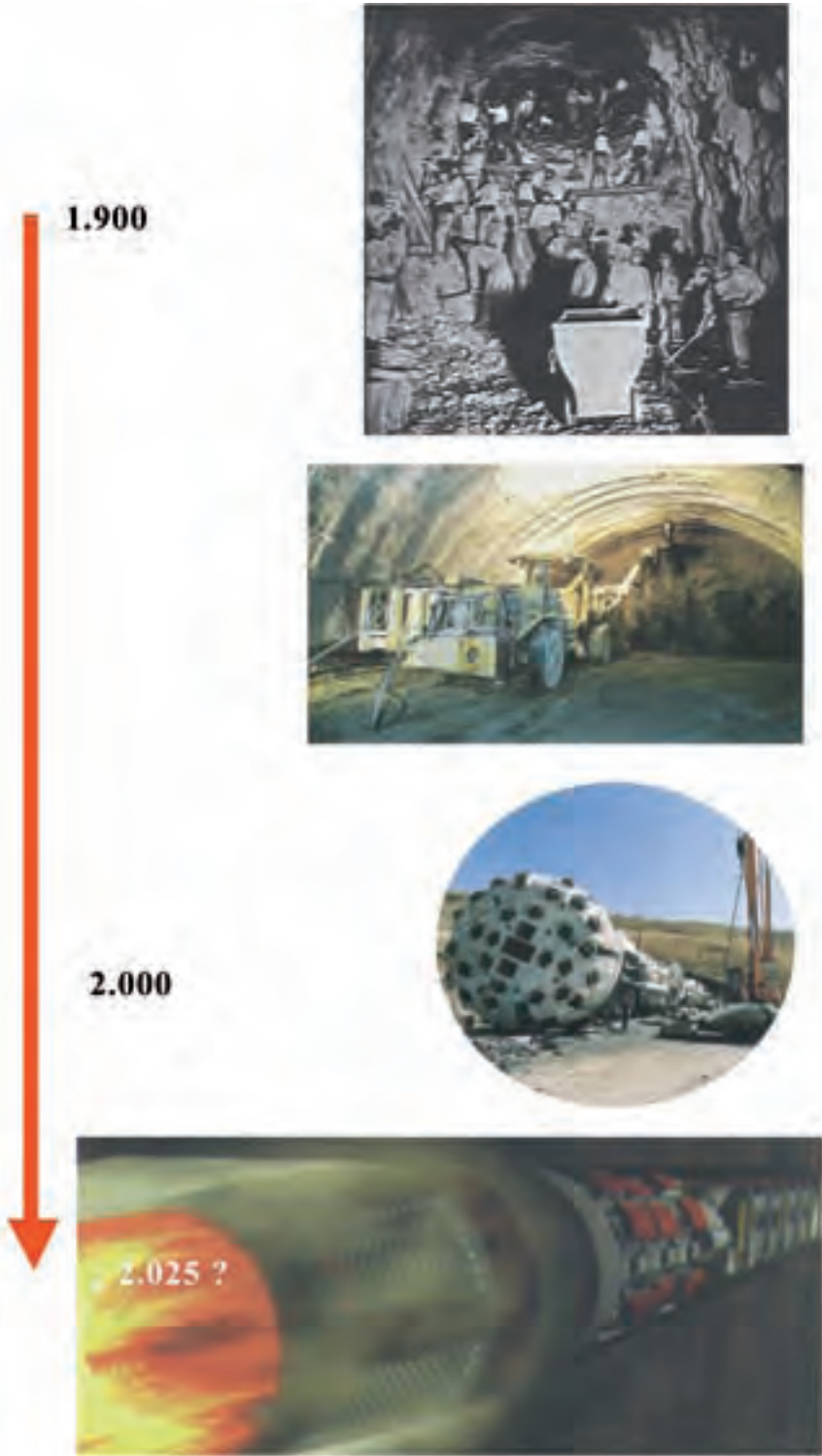


Foto 40.- Secuencia de construcción del edificio con SCC

Asimismo, en la **construcción subterránea** también se tiende a la construcción monitorizada y de acelerantes libres de álcali. La optimización del ratio prestaciones/coste va indudablemente encaminada hacia las colaboraciones con los proveedores.

Gracias a las nuevas tecnologías para diseñar materiales ligeros y aislantes tanto térmicos como acústicos, se ha contribuido a facilitar el transporte, manipulación y uso de los productos, y se cumple así con los nuevos requisitos para mejorar la **calidad de vida** de los usuarios finales.

En definitiva, se busca sobre todo sencillez y versatilidad.



10 BIBLIOGRAFÍA

- ADUVIRE, O. (1997) "Manual de Túneles y Obras Subterráneas". Ed. López Jimeno, Carlos. Madrid.
- AUSTRIAN CONCRETE SOCIETY (1990) "Guideline on Shotcrete. Part I. Application".
- BRACHER, G. (2005) "Worldwide Sprayed Concrete. State of the Art Report". Brazil.
- GIRNAU, G y HAACK, A. (1969) "Tunnel-abdichtungen". Alba Buchverlag (Düsseldorf).
- HÖFLER, J. y SCHLUMPF, J. (2004) "Spritzbeton in Tunnelbau". Ed. Putzmeister AG. Aichtal (Deutschland)
- NORMAS ESPAÑOLAS UNE 83.600 a UNE 83.610
- NORMAS ESPAÑOLAS UNE 104424
- NORMAS UNE EN 14.487-1, UNE EN 14.487-2 y UNE EN 14.488-1 a 14.488-6
- RIVAS, J.L. (1997) "Manual de Túneles y Obras Subterráneas". Ed. López Jimeno, Carlos. Madrid.
- RIVAS, J.L. (2001) "Túneles y Obras Subterráneas". Ed. Sika, S.A.U. Madrid.
- RIVAS, J.L. (2009) "Master Ingeniería Geotécnica aplicada a la obra civil. Hormigón proyectado". Granada.
- RIVAS, J.L. (2009) "Jornada Técnica sobre la Investigación, el Desarrollo y la Innovación en la Construcción Subterránea". AETOS. Madrid.
- REY, A. (2005) "IV Simposio de Túneles". Principado de Andorra.
- REY, A. (2006) "Hormigón proyectado. Dosificación, fabricación y puesta en obra". Madrid.
- VARIOS AUTORES (2005) "Primer Congreso Nacional de Impermeabilización" ANI. Madrid.
- VARIOS AUTORES (2008) "Segundo Congreso Nacional de Impermeabilización" ANI. Palma de Mallorca.