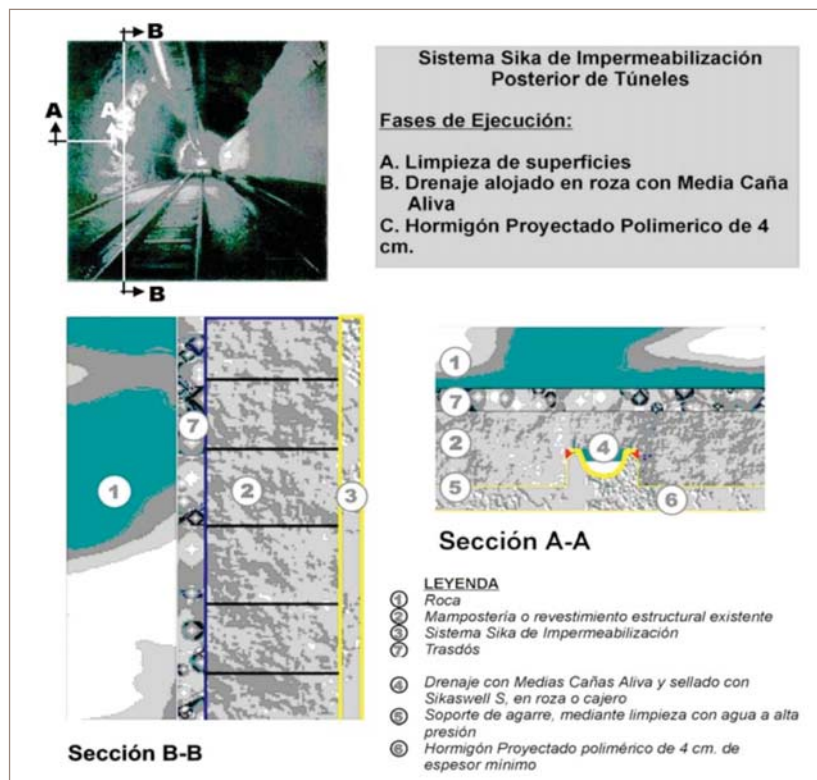


Empleo de hormigón proyectado de baja permeabilidad en el Nuevo Método Oberhasli. Características, diseño de la mezcla y puesta en obra*.

Alberto Rey. Sika, S.A.U.

Las labores de reparación de túneles y obras subterráneas incluidas en la fase denominada 'Impermeabilización Posterior' son un campo complejo de la Ingeniería Civil. A los habituales costes derivados de estos trabajos (equipos, personal especializado, materiales, etc.) se deben añadir las limitaciones y las exigencias de circulación de este tipo de vías, que en muchos casos, se encuentran en servicio durante los trabajos. En cualquiera de sus fases, la impermeabilización de túneles y galerías contribuye a la calidad final y a la durabilidad de las obras. Por este motivo, es fundamental la elección de los materiales y sistemas a emplear. En esta ponencia se analiza en detalle el hormigón proyectado como uno de los elementos fundamentales del Nuevo Método Oberhasli. En concreto, al margen de la función estructural tradicional del hormigón proyectado como sostenimiento en labores subterráneas, se considera y profundiza en su contribu-

■ Figura 1. Esquema del Nuevo Sistema Oberhasli.



ción como elemento activo en la impermeabilización de la obra.

El diseño de este tipo de hormigones, sus constituyentes, su puesta en obra, y su fabricación debe adecuarse al uso final para el que ha sido preparado.

A continuación, se detallan todos estos aspectos, aportando argumentos para cada una de las particularidades de diseño de estos hormigones proyectados de baja permeabilidad.

1. Sistema Oberhasli de impermeabilización

Atendiendo a las recomendaciones habituales en labores de reparación e impermeabilización de labores subterráneas, será 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 (CIRIA).
- Elementos necesarios y específicos del sistema de impermeabilización.
- Acciones a las que puede estar expuesta la impermeabilización.

Un sistema de impermeabilización es un conjunto de capas, caracterizado por la naturaleza, el número, la forma de colocación y el dimensionamiento de cada una de ellas.

El sistema propuesto estará constituido por todos o algunos de los elementos indicados en la figura que se muestra a continuación.

La calidad de los materiales a utilizar, las condiciones de trabajo, y por último, el equipo empleado, influyen en la calidad final de la impermeabilización.

2. campo de aplicación y materiales del Sistema Oberhasli

Las técnicas y procedimientos descritos en esta ponencia están basados en muchos años de experiencia, desde su primera aplicación en 1940 en Suiza.

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.

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.

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).

La impermeabilización consiste en 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 con un espesor mínimo de 4 cm.

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, empleados habitualmente en labores excavadas a sección completa con máquinas tuneladoras.

Se dispondría 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.

Aplicaciones especiales

Las galerías de presión o de desagüe hidráulicas, son impermeabilizadas del mismo modo, aunque en este caso se hace contra las aguas de filtración en roca contra una presión interior, y no contra la presión hidrostática exterior (en especial 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 y los nichos, donde las deformaciones pueden ser particularmente grandes.

A la hora de definir el tipo de impermeabilización en labores subterráneas, es muy importante definir y garantizar las filtraciones máximas admitidas y su durabilidad. A continuación se enumeran algunas de las patologías y problemas asociados a la filtración del agua.

- La penetración de agua por las fisuras del revestimiento estructural, de hormigón o de mampostería, amenaza su comportamiento y el de las instalaciones.
- El agua de filtración permite en invierno la formación de hielo en la calzada, con el consiguiente peligro para la circulación de vehículos. Este fenómeno se hace especialmente patente tanto en las zonas de emboquille, como en túneles cortos.
- A su vez, las filtraciones dan 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 posterior en mantenimiento, debido a la formación de hielo, la lixiviación y los desperfectos, tanto de las instalaciones, como de las paredes de hormigón del túnel.

Materiales empleados

Los materiales básicos a utilizar en el Sistema Oberhasli son:

- Morteros de fraguado rápido (Ska 4ª) y masillas expansivas (SikaSwell) para el sellado de las juntas entre la Media Caña y el cajero.
- Aditivos acelerantes de fraguado libres de álcali (Sigunita L 53 AF / Sigunita L 93 AF) y aditivos superplastificantes de alta reducción de agua para el hormigón proyectado (Gama ViscoCrete).

Como productos complementarios o auxiliares se pueden considerar:

- Adiciones a base de humo de sílice o sílices coloidales (Gama Sikatell).
- Aditivos reductores del rebote (Gama Sikatell).
- Fibras sintéticas estructurales (Sika Fiber T 48) como alternativa al mallazo metálico, y las tradicionales fibras metálicas.

Una alternativa que mejoraría el funcionamiento del Sistema, basado en una impermeabilización principal a base de hormigón proyectado de baja permeabilidad, consiste en incluir membranas de PVC-P termosoldadas.

En el caso de emplear este tipo de láminas de PVC-P se recomienda dimensionar adecuadamente los solapes y cubrir suficientemente la zona afectada, de forma análoga a como se ejecuta el Sistema Paraguas de impermeabilización de túneles.

3. Fases de ejecución del sistema Oberhasli

El Sistema Oberhasli incluye una serie de fases bien diferenciadas y se emplean los elementos y materiales que se describen a continuación.

3.1 Fase de drenaje

Una vez evaluados los caudales y naturaleza de la filtración, se realiza una 'Impermeabilización Primaria' a base de drenajes con Media Caña. El objetivo es recoger y conducir las aportaciones de agua a los drenes o cunetas longitudinales de la labor.

Este primer sistema de canalización se efectuará sistemáticamente, adecuándose a las zonas de mayor filtración, o de forma puntual.

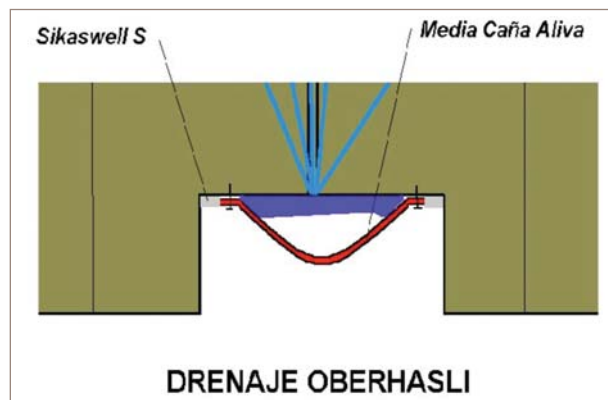
La misión de los drenes es, además de recoger el agua, presentar un soporte adecuado para la aplicación posterior del hormigón proyectado.

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 espinas de pez. Se pueden proteger en su colocación mediante pasta de cemento con acelerante ultrarrápido, 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 masilla.
- Drenaje autoformado mediante hormigón proyectado impermeable sobre mangueras retiradas o Medias Cañas, para dar forma al drenaje.

El acceso a los conductos de drenaje en su parte inferior debe figurar en el 'Proyecto Constructivo' a fin de permitir los controles posteriores de mantenimiento del túnel.

■ *Figura 2. Detalle de una media caña con masilla alojada en un cajero.*



Preparación de superficies

Se deberán eliminar partículas mal adheridas o sueltas limpiando la superficie a tratar convenientemente con agua a alta presión.

Drenajes

La geometría de 'las espinas de pez' vendrá determinada por las filtraciones de agua, 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 la bóveda a la solera, y se conectarán ramales inclinados en función de las aportaciones de agua.

Todos los drenajes, dependiendo del gálibo resultante después de colocar el espesor de la impermeabilización y de la geometría del túnel podrán ir alojados en rozas en el revestimiento con dimensiones de acuerdo al tamaño de las Medias Cañas.

A título de ejemplo, el drenaje puede formarlo una media caña de 84 mm de ancho, de manera que se pueda adaptar a las irregularidades del soporte, para alojamiento del drenaje en el revestimiento, y 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 podrá sujetar empleando:

- Pasta de cemento y acelerante de fraguado rápido.
- Anclajes especiales en ambos bordes cada 15 cm.
- Grapas en ambos bordes al tresbolillo.

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.

3.2 Fase de impermeabilización

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la impermeabilización se efectuará en toda la superficie colocando hormigón proyectado de baja permeabilidad previa limpieza de soporte existente.

Requisitos del soporte

No existirán irregularidades con un radio inferior a 20 cm. Se efectuará una limpieza con agua a alta presión 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 resultantes según lo descrito anteriormente.

Requisitos de la impermeabilización principal

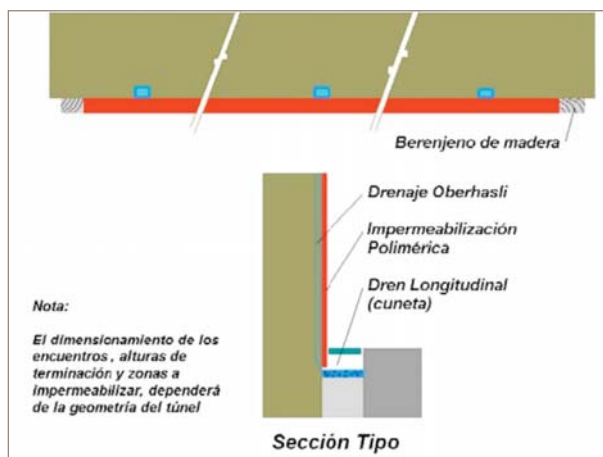
La impermeabilización con hormigón proyectado debe proteger la superficie a tratar de manera durable contra el agua de filtración.

La impermeabilización se debe adaptar sin problemas a las irregularidades del soporte, con una adherencia al soporte superior a 1N/mm^2 . Se recomienda una resistencia a compresión de al menos 35 MPa.

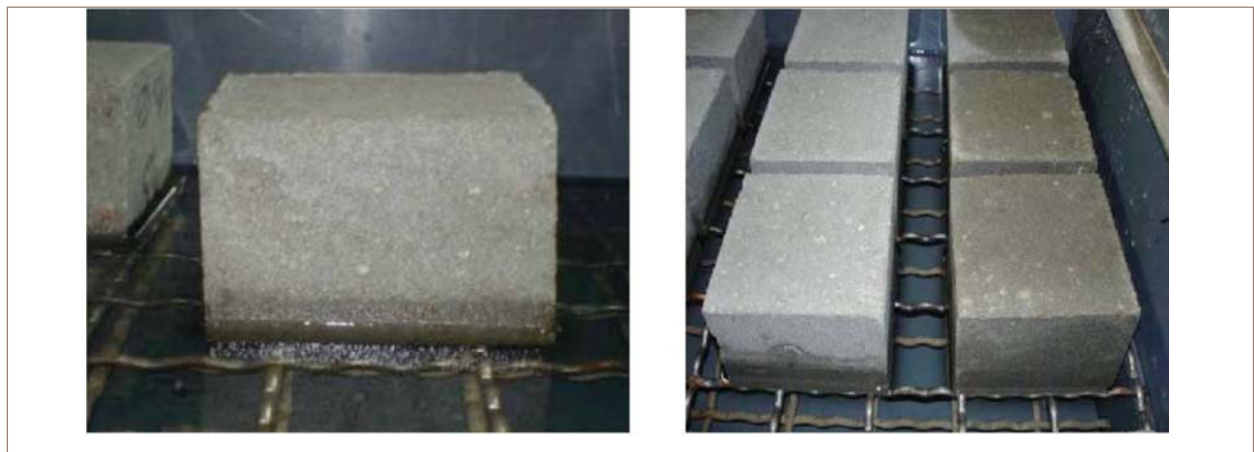
La impermeabilización con hormigón proyectado debe ser puesta en obra de manera sencilla, racional y económica, sin interrumpir el desarrollo de los trabajos posteriores, e independientemente de que el soporte esté húmedo.

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.

■ **Figura 3. Remate de la impermeabilización.**



■ **Fotografía 1. Ensayos de absorción capilar con distintas fórmulas de trabajo.**



Para ello, se tendrán en cuenta la disposición de las capas, las dimensiones mínimas del drenaje y el revestimiento.

Desde el punto de vista de diseño de mezcla, en las dosificaciones del hormigón proyectado de baja permeabilidad se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- De acuerdo a las recomendaciones de bombeabilidad y compacidad de la mezcla, la curva resultante de la mezcla de los áridos deberá encajar en el huso correspondiente de la Norma UNE 83.607/94.
- Se recomienda emplear cementos de bajo calor de hidratación. Esta práctica extendida en la actualidad también a revestimientos de túneles, permite hormigones colocados con menor fisuración, y por lo tanto una mejora en relación a su permeabilidad.
- La relación agua/cemento o agua/aglomerante será lo más baja posible, permitiendo un tiempo abierto de trabajo suficiente para garantizar su transporte y bombeabilidad en el tajo. Se recomienda trabajar con A/C próximas a 0,40.

Existen en el mercado aditivos superplastificantes de alta reducción de agua basados en polímeros policarboxilatos específicos para hormigón proyectado que permiten fabricar mezclas de este tipo.

Por otro lado, se ha evaluado el uso de aditivos de base sílice coloidal (líquido) y sílice amorfa (polvo) también empleados para reducir el rebote en hormigones proyectados al tiempo que se favorece el bombeo.

Se ha ensayado de acuerdo a la Norma UNE 83.608 la cantidad de rebote en fase de avance en diferentes secciones de túnel, obteniendo una reducción hasta el 50% de rebote con mezclas en las que se incorpora un 2% de Sikatell 200 (líquido).

Al igual que sucede en la fase de excavación, en los trabajos de reparación en los que se opta por el Sistema Oberhasli, la reducción de rebote supone una mejora de costes muy importante

■ **Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos de absorción capilar.**

Ensayo Absorción Capilar (%)	Testigo 1	Testigo 2	VC5980	VC5980 + Tell200 (2%)	SKTN100	SKTN100 + Tell200 (1%)	SKTN100 + Tell200 (2%)
1 día	1,6349	1,0411	0,5640	0,5097	0,4302	0,4075	0,3902
7 días	2,3072	1,2103	1,0090	0,8022	0,7316	0,7128	0,7093

(pérdida de material, consumibles, desescombro, tiempos, etc.) y debe ser contemplada en los estudios iniciales.

Desde el punto de vista de la permeabilidad, se han ensayado diferentes mezclas patrón y dosificaciones para hormigones proyectados fabricados con aditivos específicos, obteniendo una mejora importante en sus características.

Otro de los elementos a considerar son las fibras estructurales sintéticas para hormigón proyectado Sika Fiber T 48. Estas fibras presentan las siguientes ventajas:

- Sustitución del mallazo metálico mejorando los tiempos, la seguridad y los costes de puesta en obra, al tiempo que se evitan las `sombras` de hormigón durante la proyección y relleno del trasdós de estos elementos.
- Debido a su peso específico (<1 kg/l) el número de fibras/kg es muy superior al equivalente de fibras metálicas permitiendo un `cosido` del hormigón proyectado sobre el soporte y reduciendo su fisuración.
- Las poliolefinas son resistentes a los ataques físico-químicos que se pueden presentar habitualmente en una matriz cementosa en un túnel. Al no oxidarse, como ocurre con las fibras metálicas, se garantiza la durabilidad de la obra.

Para la fabricación industrial del hormigón, se recomienda contratar el suministro desde una planta próxima provista de amasadora.

De esta forma, el control del agua de amasado y de la humedad de los áridos, así como, el uso de equipos dosificadores automáticos de los distintos aditivos empleados, mejoran sensiblemente la homogeneidad de la mezcla, favoreciendo la puesta en obra y el resultado final sobre el soporte.

En el caso de trabajar con una planta sin amasadora, se extremarán las precauciones en el control del aporte de agua a la mezcla, evaluando la consistencia de la mezcla con ayuda del par de giro del tambor de la cuba y (conos Abrams) por personal técnico del laboratorio de Calidad.

En las instalaciones de la planta, se recomienda cubrir los acopios de áridos para evitar el lavado de finos debido a la lluvia y viento, y las consiguientes variaciones de consistencia en la mezcla.

En zonas altas o frías una buena práctica consiste en disponer los equipos necesarios (acumuladores, calentadores, etc.) nece-

sarios para calentar el agua, y de esta forma, la mezcla de hormigón.

La temperatura de la mezcla es uno de los aspectos fundamentales en el comportamiento y fraguado rápido del hormigón proyectado.

Una temperatura adecuada de la mezcla (20 °C) permite optimizar la cantidad de cemento y reducir la dosificación del acelerante de fraguado en el robot, influyendo notablemente en los costes finales. Como consecuencia directa de ello, se obtiene un hormigón menos permeable objetivo de este tipo de trabajos.

El transporte del hormigón debe tenerse muy en cuenta durante el diseño de la mezcla. Para ello, se considerarán los tiempos mínimo y máximo de transporte estimados, así como los rangos de temperatura de la mezcla (función de las temperaturas ambientales y del sistema de acopio en la planta).

En caso necesario, se emplearán aditivos estabilizadores de fraguado para trabajar a largas distancias o con tiempos elevados de espera.

Si la planta suministradora no dispone de amasadora, se recomienda emplear siempre los mismos camiones hormigonera para el servicio, y revisar frecuentemente el estado de las aspas del tambor, ya que en este caso serán las responsables también del mezclado del hormigón.

Dependiendo de las dimensiones de la labor y de la maquinaria disponible, se seleccionará el Sistema de Proyección más adecuado para los trabajos.

En el hormigón proyectado por `Vía Seca` se dosificará la cantidad correspondiente de cemento (normalmente 400 kg) por cada 1.000 litros de áridos, considerando la densidad aparente de los áridos.

Se evitará que las humedades de los áridos sean superiores al 2%. De esta forma se elimina la formación de bloques de cemento hidratado con el agua de aportación de esos áridos.

Estos bloques, en el caso de presentarse, provocarían elevadas presiones y atranques durante el bombeo.

En la actualidad, el sistema de proyección más empleado para hormigón proyectado es la `Vía Húmeda`.

Este sistema permite alcanzar altos rendimientos de trabajo con equipos robotizados y un mayor control de la calidad final del

■ Fotografía 2. Equipo de proyección trabajando en un túnel.



hormigón colocado, propiciado por el ajuste de la cantidad de agua y acelerante de fraguado.

Durante la puesta en obra se recomienda seguir las recomendaciones de buena práctica del 'Arte de gunitar', prestando especial atención a la distancia y ángulo de proyección, presión de aire, estado del soporte, etc.

En la fase de proyección se recomienda emplear acelerantes de fraguado libres de álcali (Sigunita L 53 AFS / Sigunita L 93 AF). Las principales ventajas operativas de este tipo de acelerantes AF son:

- Mejora en las condiciones de trabajo para los operarios ya que el pH = 3 y no se genera niebla cáustica en la proyección.
- Mejora el Medio Ambiente ya que no se derraman partículas con altos contenidos alcalinos.
- Mejora las labores de manipulación del producto en las recargas, el almacenaje, etc.
- Mejora la calidad final del hormigón al optimizar la cantidad de cemento y minimizar el efecto sobre las resistencias a 28 días del hormigón.
- Reduce los costes por metro cúbico y los tratamientos posteriores de las aguas del túnel antes de su vertido a cauces naturales (menores costes en la corrección de pH).

Considerando la permeabilidad del hormigón proyectado, cabe decir:

- Los acelerantes AF permiten reducir la cantidad de cemento obteniendo la misma resistencia final del hormigón colocado. Como consecuencia directa, el calor de hidratación generado es menor y se reduce la fisuración por retracción del hormigón.

A modo de ejemplo, se adjunta una dosificación tipo de hormigón proyectado incluyendo todos los aditivos y adiciones mencionados.

Ejemplo dosificación hormigón proyectado:

Cemento CEM II 42,5 R; 425 kg
Arena 0/4; 1412 kg
Grava 5/12; 420 kg
Agua (A/Ag = 0,40); 175 litros
ViscoCrete 5980 (0,9 %); 3,6 litros
Sikatell 200 (2%); 8,5 kg
Sika Fiber T 48; 4 kg
Sigunita L 53 AFS; 4%

En cualquier caso, se recomienda estudiar detalladamente cada obra antes de iniciar los trabajos, con el fin de optimizar las partidas cumpliendo las exigencias del Pliego de Condiciones de la Obra.

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 resistencia compresión 'in situ'. Penetrómetro.
- UNE 83.604/94 - Determinación resistencia compresión 'in situ'. 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 resistencia compresión. Penetración - extracción.
- UNE 83.610 - Determinación del contenido de fibras. Consideraciones generales.

Bibliografía

Adivire, O. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Ed. López Jimeno, Carlos. Madrid (1997).

Girnau, G y Haack, A. "Tunnel-abdichtungen". Alba Buchverlag (Düsseldorf) (1969).

Hurtado, R, Pardo, G, Rey, A. Túneles y Obras Subterráneas. Ed. Sika, S.A.U. Madrid (2010).

Normas españolas UNE 104424.

Rivas, J.L. Túneles y Obras Subterráneas. Ed. Sika, S.A.U. Madrid (2001).

Rey, A. IV Simposio de Túneles. Principado de Andorra (2005).

Varios autores. Primer Congreso Nacional de Impermeabilización, ANI. Madrid (2005).

Varios autores. Segundo Congreso Nacional de Impermeabilización, ANI. Palma de Mallorca (2008).