

MANUAL SIKA SOBRE HORMIGÓN PROYECTADO

(SPRAYED CONCRETE HANDBOOK)

Editores

Sika Services AG
Tüffenwies 16
CH-8048 Zürich
www.sika.com

Putzmeister AG
Max-Eyth-Strasse 10
D-72631 Aichtal
www.putzmeister.de

Autores

Ing. Jürgen Höfler, Putzmeister AG
Ing. HTL Jürg Schlumpf, Sika Services AG
Ing. FH Markus Jahn, Sika Services AG

Diagramación

Sika Services AG
Corporate Marketing Service

© 2011 by Sika AG

Todos los derechos reservados

4. Edición 08/2011



PRÓLOGO

El hormigón proyectado es un material de fraguado rápido empleado para estabilizar y darle soporte a estructuras y en aplicaciones de hormigón en que no se usa encofrado. El hormigón proyectado es resultado de la interacción entre hombre, máquina y hormigón. El hombre, representado por el operador de la boquilla, requiere conocimientos técnicos y compromiso con su trabajo. Éste debe poder confiar plenamente en la máquina y el material de hormigón. La interacción y calidad de estos componentes es lo que finalmente determina el éxito de una aplicación de hormigón proyectado.

En la época actual, caracterizada por cada vez mayor movilidad y limitaciones de espacio, la demanda de infraestructura subterránea sigue creciendo. El hormigón proyectado juega un papel importante en esta tendencia. Este método, económicamente sobresaliente y casi ilimitado desde el punto de vista técnico, constituye la respuesta evidente para muchos retos actuales.

En este contexto, Putzmeister AG y Sika AG han conformado una asociación global estratégica enfocada en el hormigón proyectado para túneles y minería. La asociación le permite a nuestros clientes conocer el innovador, constante y relevante desarrollo de las máquinas de hormigón proyectado y los aditivos de alta demanda en la instalación altamente mecanizada del hormigón proyectado.

Es así como las dos empresas han decidido publicar este manual, con el fin de facilitarle a las partes interesadas dar el paso fascinante hacia el mundo del hormigón proyectado en aplicaciones para construcciones subterráneas.

Sus autores, los ingenieros Jürg Schlumpf y Jürgen Höfler, trabajaron durante muchos años en proyectos y gerencia de productos en las dos empresas. El folleto se ha desarrollado tanto como introducción al hormigón proyectado y su aplicación, como para permitir un estudio más profundo de este magnífico método de construcción. Se ofrece como una fuente confiable de información dirigida a nuestros socios.

Markus Jahn, quien se desempeña desde hace varios años como Ingeniero de Producto de Hormigón Proyectado en Sika Services AG, revisó y le hizo adiciones a la presente nueva edición (de agosto de 2011).

Agosto de 2011

TABLA DE CONTENIDO

1.	Prólogo	3
2.	Introducción	7
3.	Usos del Hormigón Projectado	10
3.1	Tipos de construcción	11
3.2	Estabilización	12
3.3	Revestimiento	14
4.	Materiales del Hormigón Projectado	16
4.1	Materiales de base	16
4.1.1	Cemento	16
4.1.2	Aditivos	16
4.1.3	Agregados	18
4.1.4	Contenido de finos	19
4.1.5	Agua	20
4.2	Aditivos para el hormigón projectado	20
4.2.1	Acelerante de fraguado y endurecimiento para hormigón projectado (shotcrete)	21
4.2.2	Reductores de agua de alto rango (HRWR - High Range Water Reducers)	26
4.2.3	Estabilizadores de consistencia / Retardadores de fraguado	29
4.2.4	Estabilizadores de mezcla	30
5.	Requerimientos del Hormigón Projectado	33
5.1	Desarrollo de resistencia temprana	33
5.2	Resistencia final	34
5.3	Hormigón projectado reforzado con fibra	36
5.4	Hormigón projectado con mayor resistencia al fuego	39
5.5	Durabilidad	40
6.	Hormigón Projectado Húmedo	42
6.1	Usos	42
6.2	Ventajas	42
6.3	Diseño de la mezcla del hormigón projectado húmedo	43
6.4	Balance de materiales del hormigón projectado húmedo	45
6.5	Diseño de mezclas especiales para hormigón projectado húmedo	46
6.6	Curva de gradación del hormigón projectado	48
6.7	Aseguramiento de calidad	49
7.	Hormigón Projectado Seco	50
7.1	Usos	50
7.2	Ventajas	50
7.3	Diseño de la mezcla del hormigón projectado seco	51
7.4	Contenido de humedad de los agregados	51
7.5	Balance de materiales del hormigón projectado seco	52

8.	Aplicaciones del Hormigón Projectado	53
8.1	Seguridad	53
8.2	Sustrato del hormigón projectado	54
8.3	Projectado	55
8.3.1	Parámetros recomendados para el projectado húmedo	56
8.3.2	Reglas para la aplicación del projectado	58
8.4	Configuración de boquillas	59
8.5	Métodos de medición	61
8.5.1	Método de penetración de la aguja	62
8.5.2	Método de perforación con perno (Stud Driving (Hilti))	62
8.5.3	Método de perforación de núcleo (Drill Core)	63
8.5.4	Clases de resistencia (EN 14487-1)	63
8.6	Rebote	65
8.7	Desarrollo de polvo	66
8.8	Sombras de projectado	67
8.9	Mecanización / Automatización	67
9.	Proceso de Projectado	68
9.1	Proceso de projectado denso	70
9.1.1	Ventajas	71
9.1.2	Equipos para proceso de flujo denso	72
9.2	Proceso de flujo diluido	73
9.2.1	Ventajas	74
9.2.2	Equipos para proceso de flujo diluido	74
10.	Equipos para el Projectado de Hormigón	76
10.1	Sistemas Sika-Putzmeister de projectado de hormigón	76
10.2	Equipos de projectado de hormigón Aliva	78
10.3	TBM Aliva con robots projectadores	80
10.4	Unidades de dosificación Aliva	81
11.	Impermeabilización	82
11.1	Sikaplan® - Membranas impermeables	82
11.2	FlexoDrain W y Sika® Shot-3	83
12.	Guía de Solución de Problemas	84
12.1	Problemas de desempeño	84
12.2	Problemas de bombeo	85
13.	Índice	86

2 INTRODUCCIÓN

En el último siglo el hormigón proyectado ha remplazado los métodos tradicionales de trabajo en perfiles de revestimientos para túneles y ha llegado a ser muy importante en la estabilización de tramos de túneles excavados. La construcción moderna de túneles sin emplear hormigón proyectado es prácticamente impensable. La expresión “hormigón proyectado” [sprayed concrete] comprende varios componentes de una tecnología completa:

- el hormigón proyectado o shotcrete como material
- colocación de hormigón proyectado o shotcreting como proceso de colocación
- el hormigón proyectado o shotcrete como método de construcción

Estos tres componentes definen una completa tecnología que cuenta con una larga tradición, un enorme potencial de innovación y un gran futuro. El material de hormigón que es proyectado es un diseño de mezcla de hormigón que es determinado por los requerimientos de la aplicación y los parámetros especificados. Como regla general, esto significa una reducción en la gradación máxima de partículas a 8 mm, mayor contenido de ligante o binder y el empleo de aditivos especiales para el hormigón proyectado para controlar las propiedades del material. El hormigón proyectado se empleó por primera vez en 1914 y durante las últimas décadas se ha venido desarrollando y mejorando constantemente.



Fig. 2-1: Proyectado de hormigón con Sika®-PM 500

Actualmente existen dos procesos distintos de proyectado de hormigón:

- proyectado en seco (dry spraying)
- proyectado húmedo (wet spraying)

Los requerimientos principales de la mezcla consisten en su manejabilidad o trabajabilidad [workability] (como en las aplicaciones para bombeo y proyectado) y su durabilidad, y son los siguientes:

- alto nivel de resistencia temprana
- características correctas de fraguado
- trabajabilidad amistosa para el usuario
- (largos tiempos abiertos)
- buena capacidad de bombeo (entrega de flujo denso)
- buena rociabilidad (maleabilidad)
- mínimo rebote y polvo

El proceso de aplicación del hormigón proyectado indica el método de su instalación. Luego de la producción, el hormigón es transportado al equipo de proceso usando medios convencionales. En el punto de uso el hormigón o mortero proyectado se alimenta a través de tubos o mangueras selladas resistentes al exceso de presión, se aplica rociándolo sobre la superficie y se compacta. Los siguientes métodos de aplicación se emplean en esta etapa del proceso:

- proceso de flujo denso para el hormigón proyectado húmedo
- proceso de flujo diluido [thin-flow process] para el hormigón proyectado seco
- proceso de flujo diluido para el hormigón proyectado húmedo

Antes de proyectarse, el hormigón pasa a través de la boquilla a alta velocidad. Ahí se forma el chorro y se agregan los demás elementos relevantes que componen la mezcla, tales como agua en el hormigón proyectado seco, aire comprimido en el proceso de flujo denso y acelerantes del hormigón proyectado [shotcrete], cuando se requieren. Enseguida la mezcla del hormigón proyectado se dispara sobre el sustrato, a alta presión,

lo cual compacta el hormigón de forma tan poderosa que instantáneamente se forma una estructura de hormigón plenamente compactado. Dependiendo de la aceleración del hormigón proyectado, es posible aplicarlo a cualquier altura, incluyendo aplicación sobre cabeza ("overhead").

El hormigón proyectado puede emplearse en muchas aplicaciones. Hormigón y mortero proyectados se usan en reparaciones de hormigón, construcción de túneles y minería, estabilización de taludes y diseño artístico de edificaciones. El hormigón proyectado presenta varias ventajas:

- aplicación a cualquier altura, pues se adhiere de inmediato y sostiene su propio peso
- puede aplicarse sobre sustratos desiguales
- presenta buena adherencia con el sustrato
- configuración totalmente flexible del espesor de la capa en el lugar de aplicación

- trabajo en hormigón sin encofrado
- se puede usar hormigón proyectado reforzado (con malla o fibra)
- rápidamente se puede obtener una “piel” con capacidad de carga sin encofrados

[shuttering] ni largos tiempos de espera

El hormigón proyectado es un método de construcción flexible, económico y rápido, pero requiere un alto grado de mecanización y trabajadores especializados como elementos esenciales.



Fig. 2-2: Proyectado en seco [Dry spraying]



Fig. 2-3: Proyectado húmedo [Wet spraying]

3 USOS DEL HORMIGÓN PROYECTADO

La construcción con hormigón proyectado se emplea en muchas clases de proyectos. La flexibilidad y la economía de este material resultan ventajosas para edificaciones en superficie así como en el subsuelo, la construcción de túneles y construcciones subterráneas especiales y de hecho, en toda la industria de la construcción. Los siguientes usos están generalizados:

- estabilización de excavaciones en la construcción de túneles y obras subterráneas
- revestimientos de túneles y cámaras subterráneas
- estabilización en la construcción de minas y galerías
- reparaciones de hormigón (reemplazo y fortalecimiento del hormigón)
- restauración de edificaciones históricas (estructuras de piedra)
- trabajos de sellado
- estabilización de pendientes y trincheras
- revestimientos de protección
- cursos de desgaste
- estructuras especiales ligeras para portar carga
- aplicaciones creativas
- construcción de piscinas

En términos de su importancia, la construcción de túneles, la minería y las reparaciones de hormigón encabezan la lista. En la construcción de túneles y en minería, se emplea principalmente para excavar y estabilizar y en revestimientos temporales y permanentes de arcos. También en todas las demás obras en las que es apropiado usar hormigón. Las grandes cavidades, por ejemplo, frecuentemente se llenan con hormigón proyectado. La posición del hormigón proyectado como principal método empleado en construcciones de hormigón, conjuntamente con revestimientos de segmentos de túneles ("tubbing") y anillos interiores de hormigón, se ha venido confirmando y fortaleciendo. Las limitaciones que presenta su uso radican en las interfaces técnicas y económicas con los demás procesos de hormigón y métodos de construcción.



Fig. 3-1: Estabilización de excavaciones con hormigón proyectado [shotcrete]

3.1 TIPOS DE CONSTRUCCIÓN

El hormigón proyectado se emplea en todas las áreas de la construcción de túneles –en túneles de carreteras o ferrocarriles, drenaje de aguas y estructuras militares subterráneas, además de estabilización de taludes–. Trátese de la construcción de túneles bajo edificios o para salvar obstrucciones en vías, el método de construcción seleccionado lo determinan las propiedades de portar carga y la estabilidad del sustrato que el túnel atraviesa. La principal diferencia se da entre la excavación total de un tramo entero en una sola operación y la excavación parcial empleando muchos métodos y encofrados diferentes. Si no es posible realizar una excavación completa debido a la estabilidad de la roca, con frecuencia se excava el perfil final en varias fases.

Se emplea en la construcción subterránea, porque con frecuencia se ejercen altos niveles de tensión sobre la estabilización y el revestimiento recién colocados en una excavación. Con frecuencia se permite la deformación predeterminada del tramo excavado y sólo entonces se da un sello no positivo a la estabilización. Esto lleva a que las fuerzas de tensión se distribuyan alrededor del tramo excavado y en torno a la cara de la excavación.

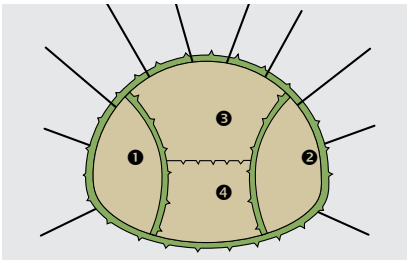


Fig. 3-2: Método de la pared lateral: galerías laterales (1+2), corona (3), núcleo (4)

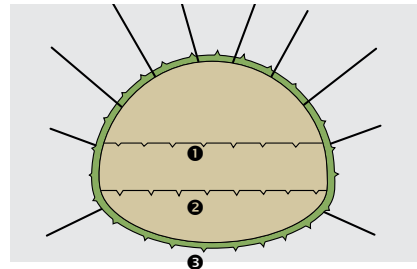


Fig. 3-3: Método de impulso de la corona: encabezado superior (1), banca (2), invertido (3)

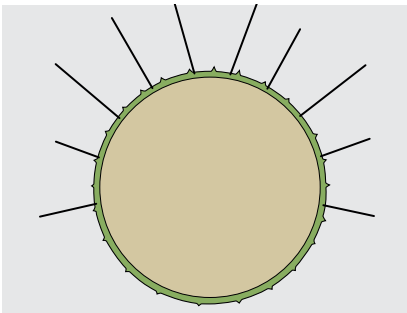


Fig. 3-4: Método TBM en roca dura y perforación full-face con voladura [blast]

3.2 ESTABILIZACIÓN

El hormigón proyectado es un material perfecto para estabilizar excavaciones. Su flexibilidad única al permitir seleccionar el espesor de la aplicación, la formulación del material (fibra), su rendimiento, el desarrollo de una resistencia muy temprana (tanto en la aplicación seca como húmeda), y la posibilidad de lanzar nuevamente en cualquier momento, convierten al hormigón proyectado en un material completo para la estabilización de excavaciones.

Se distingue entre la excavación completa y parcial, según la capacidad de portar carga y la estabilidad del sustrato. La excavación se hace mediante perforación y voladuras o empleado métodos mecánicos. En línea con el viejo dicho sobre la construcción de túneles que reza "Está oscuro frente a la pica", con frecuencia la perforación preliminar o los túneles piloto anteceden a la construcción principal, cuando las condiciones del terreno son difíciles. Posteriormente estos túneles exploratorios se incorporan a la excavación del futuro túnel o se usan como túneles paralelos para múltiples propósitos. En todas estas aplicaciones se emplea el hormigón proyectado con fines de estabilización si la cara excavada no es lo suficientemente estable. El hormigón proyectado permite construir muy rápidamente una delgada capa de base en la forma de una piel fina. Si la capacidad de portar carga del hormigón proyectado no basta, es posible reforzarlo (con fibra y acero). Cuando se usan anillos de acero y malla, el hormigón proyectado se convierte en material tipo celosía o entramado [lattice] entre las vigas. Empleando pernos, las propiedades de portar carga de la piel de hormigón proyectado pueden ligarse a las propiedades de portar carga del sustrato cercano a la excavación. Si hay alto nivel de penetración de agua y fuerte fraccionamiento de la roca, o ambas cosas, la inyección e impermeabilización preliminar con gunita y canales de drenaje crearán las condiciones requeridas para aplicar la capa de hormigón proyectado.

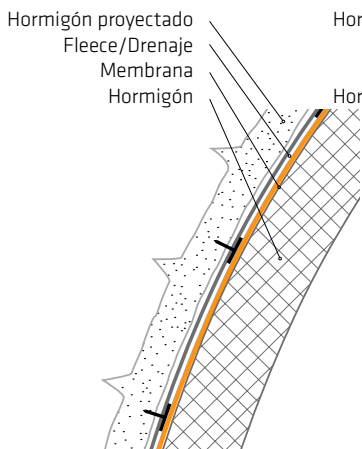


Fig. 3-5: Revestimiento de túnel con C. proyectado, membranas, hormigón

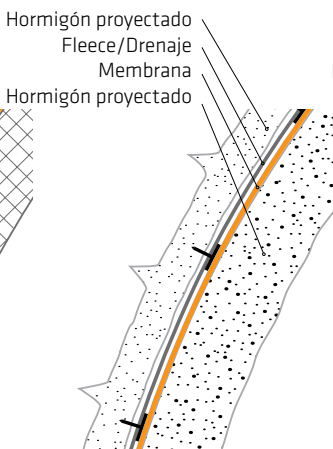


Fig. 3-6: Revestimiento de túnel con C. proyectado, membranas, C. proyectado

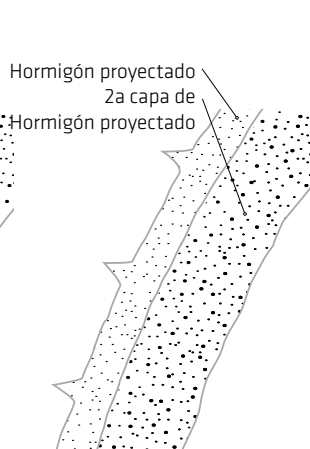


Fig. 3-7: Revestimiento de túnel con C. proyectado

Al igual que todos los métodos de construcción, la construcción subterránea ha evolucionado históricamente a nivel regional. Lo que varía con respecto a la construcción subterránea son las diferentes condiciones geográficas que presentan las distintas regiones. Debido a esto y a la variedad de proyectos que existen (en sus cortes transversales y su longitud), se han desarrollado diferentes métodos. En la excavación parcial, éstos son básicamente el New Austrian Tunneling Method (NATM) [Nuevo método austríaco de construcción de túneles], el German Core Method [Método alemán de núcleo] y el Belgian Underpinning Method [Método belga de apuntalamiento]. El tramo completo se divide en tramos más pequeños, cada uno de los cuales se estabiliza temporalmente, para luego unirse para conformar el tramo completo únicamente al final. En la aplicación de la excavación completa, los sistemas de mecanización parcial o completa presentan un enorme potencial de desarrollo. A largo plazo las restricciones en cuanto al uso se manifestarán únicamente en los aspectos económicos de las máquinas perforadoras de tuneledoras (TBM). En las máquinas perforadoras de túneles se instalarán sistemas permanentes de hormigón proyectado.



Fig. 3-8: Método de la pared lateral



Fig. 3-9: Método de impulsar la corona [Driving of Crown method]

3.3 REVESTIMIENTO

El revestimiento final de un túnel es la referencia permanente visible del contratista del túnel. La excepción es un revestimiento final con paneles. Tanto el revestimiento de hormigón como el hormigón proyectado se emplean para lograr un revestimiento final perdurable. Entre más elevadas sean las especificaciones en cuanto a la uniformidad del acabado del hormigón, más probabilidad hay de emplear un revestimiento de hormigón estructural con encofrados de anillos interiores. Los acabados interiores trabajados con encofrado también se consideran estéticamente superiores. Aunque este revestimiento requiere instalaciones nuevas y adicionales de gran escala, el costo se puede compensar por la economía de los anillos interiores de hormigón, dependiendo de la longitud del proyecto. Este trabajo exige moldes masivos para los anillos interiores y tecnología mecanizada para el suministro del hormigón, su compactación y movilización de las encofrados. El hormigón de producción convencional requiere mucho trabajo de compactación, porque el hormigón en los revestimientos de hormigón generalmente presenta un significativo espesor de pared.



Fig. 3-10: Revestimiento con hormigón proyectado

El acceso generalmente es difícil, lo cual significa que se emplean los llamados vibradores de encofrados, aunque su capacidad es limitada en profundidad y por lo tanto son muy intensivos en mano de obra y están sujetos a desgaste, lo cual genera contaminación adicional por ruido. Una innovación importante puede ser emplear hormigón autocompactante [self-compacting concrete] (SCC), que reemplaza todo el proceso de compactación mecánica y presenta una consistencia de flujo libre que permite llenar por completo estas encofrados.

Cuando los requerimientos de uniformidad no son muy elevados, también resulta apropiado emplear hormigón proyectado para recubrimientos finales. Antes de instalar la membrana impermeable, con frecuencia se nivela la superficie del hormigón proyectado para hacerla lo más lisa posible, empleando un hormigón proyectado más fino (gunita) que mejora muchísimo las condiciones para la colocación de las membranas impermeables sin arrugas o pliegues.

Table 3-1: Comparación de métodos usados para revestimientos (hormigón proyectado versus hormigón)

Revestimiento durable final (método de construcción)	Ventajas del método seleccionado
Revestimiento de hormigón proyectado	<p>Uso de la instalación actual a partir de aplicación de hormigón proyectado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - permite una mejor economía en túneles más cortos - no requiere instalaciones adicionales <p>A partir del revestimiento final conjuntamente con la estabilización:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se ahorra una operación entera
Revestimiento interno de hormigón	<p>Superficie de hormigón lisa / pareja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - menos resistencia al aire (ventilación) - mejores condiciones de iluminación - apariencia más atractiva - reparación de instalaciones más sencilla <p>Se evitan desigualdades en el hormigón por haber omitido el proceso de proyectado.</p> <p>Sin el requerimiento de "resistencia muy temprana", más opciones para la mezcla de hormigón en requerimientos de durabilidad.</p>

4 MATERIALES DEL HORMIGÓN PROYECTADO

4.1 MATERIALES DE BASE

El hormigón es un sistema compuesto de tres materiales: cemento, agregados y agua. Con el fin de extender sus propiedades y aplicaciones potenciales, fácilmente puede convertirse en un sistema de cinco componentes, lo cual redundará en interacciones complejas, especialmente cuando se combinan con los parámetros de aplicación del hormigón proyectado. Por lo tanto, con el hormigón proyectado es importante no modificar más de un parámetro a la vez durante la fase de prueba. Únicamente una solución técnicamente correcta y económicamente viable podrá satisfacer a todas las partes.

4.1.1 CEMENTO

En la mezcla de hormigón proyectado el cemento actúa como “pegante” que adhiere e incorpora las partículas de agregados, uniéndolas en la matriz del cemento. La cal del cemento es también el principal lubricante en el suministro del hormigón proyectado. El cemento tiene un fraguado hidráulico y por lo tanto es parcialmente responsable de las propiedades mecánicas del hormigón fraguado. Sin embargo, presenta un requerimiento adicional por encima de su empleo en el hormigón estructural. El cemento para el hormigón proyectado debe siempre iniciar el fraguado con extrema rapidez, ofrecer buena adherencia y presentar una muy elevada resistencia temprana.

El cemento que no reacciona bien cuando se combina con acelerantes de fraguado o aditivos de reacción lenta en cementos combinados, no es particularmente apropiado para la producción de hormigón proyectado destinado a la estabilización.

El contenido de cemento es en general de 300-450 kg/m³ y depende del proceso de proyectado y de los requerimientos del hormigón proyectado.

4.1.2 ADITIVOS

Los aditivos se emplean en el hormigón proyectado para toda una variedad de requerimientos y por lo tanto presentan características muy diferentes, así:

- suplementar el equilibrio de finos ≤ 0.125 mm (relleno)
- mejorar propiedades específicas de su durabilidad (fuerza o resistencia a los solventes o a otras fuerzas)
- aumentar su capacidad de retención de agua (estabilización de la mezcla)
- reducir la presión de bombeo durante la entrega (lubricante)

- sustituir partes del cemento (optimización de costos)
- acelerar (alto grado de resistencia temprana)

Se emplean muchos tipos diferentes de finos. Un factor importante en la selección de aditivos es la economía y por lo tanto la disponibilidad local de esos mismos finos, razón por la cual se prefieren distintas clases en distintos sitios.

Tabla 4-1: Efectos de los aditivos en el hormigón proyectado y el mortero

Efecto	Tipo de adiciones	Comentarios
Hidráulico	Cemento	El tipo y la calidad del cemento afectan la trabajabilidad y el desarrollo de resistencia.
Hidráulico Latente	GGBS (Inerte) Cenizas volantes (tipo W)	Desaceleran el desarrollo de resistencia y aumentan la durabilidad.
Puzolánico	Humos de sílice Cenizas volantes (tipo V)	Mejoran la durabilidad, aumentan la adherencia (bonding) y con ello, las propiedades mecánicas. Reducen el pH del agua en los intersticios del hormigón; por lo tanto la cantidad empleada debe ser limitada.
Inerte	Relleno de piedras (por ej., relleno de piedra caliza)	No desarrollan resistencia por sí solas, pero ayudan al mejorar la matriz de partículas.

Humos de sílice

Los humos de sílice son SiO₂ amorfo, que ocurre como derivado de la producción de silicio [silicon]. El material presenta una superficie específica enorme y es altamente reactivo y es por lo tanto técnicamente apropiado para una variedad de requerimientos. No afecta adversamente la resistencia temprana. Los humos de sílice son el aditivo ideal, pero su costo es elevado.

Cenizas volantes

Las cenizas volantes se obtienen de los filtros eléctricos empleados en la generación de electricidad con carbón pulverizado. Son baratas y presentan buenas propiedades de trabajabilidad. También son apropiadas para requerimientos específicos de durabilidad. La homogeneidad del producto es un factor importante con las cenizas volantes.

Escoria

La escoria se genera en la fundición de mineral de hierro. También es barata y es un excelente relleno, pero reduce las propiedades de resistencia temprana. La durabilidad del hormigón proyectado con frecuencia se puede mejorar con escoria.

Tabla 4-2: Características de los aditivos en el hormigón proyectado y el mortero

Características	Cemento	Humos de sílice	Cenizas volantes	Escoria	Relleno de piedra
Hormigón fresco					
Manejo	++	++	+++	+	+++
Capacidad de retener agua	++	+++	+	+	++
Desarrollo de resistencia					
Resistencia inicial muy temprana hasta 4 h	+++	+	-	-	+ / -
Resistencia temprana hasta 12 h	++	++	-	-	+ / -
Resistencia temprana hasta 12 h	++	+++	++	+++	+ / -
Resistencia final					
Durabilidad					
Resistencia a la penetración de agua	++	+++	++	++	+
Resistencia al sulfato	-	++	+ / -	+++	+ / -
Resistencia ASR	-	+ / -	+ / -	+++	+ / -

+ mejora - deterioro

4.1.3 AGREGADOS

Los agregados (partículas de piedra) conforman el marco (framework) de la matriz de hormigón proyectado. Aproximadamente el 75 % del volumen del hormigón consiste en los componentes de arena y gravilla. La composición geológica de los agregados influye enormemente en la trabajabilidad y las propiedades del hormigón endurecido. Los agregados cumplen diferentes funciones:

- Son el parámetro que más influye en la homogeneidad de la mezcla de hormigón proyectado
- Son el parámetro inicial que determina el requerimiento de agua
- Constituyen un relleno económico en la matriz de hormigón proyectado
- Permiten alcanzar las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión en la flexión y resistencia a la compresión)
- Ejercen una fuerte influencia sobre la trabajabilidad de la mezcla (forma de las partículas y finos)
- Influyen enormemente sobre la durabilidad requerida (porosidad y pureza)

Por todas estas razones hay que darle la más alta prioridad a los agregados, lo cual tristemente no siempre ocurre. Si se cambia el contenido de finos de ≤ 0.125 mm en tan sólo un pequeño porcentaje, una mezcla en extremo trabajable puede convertirse muy pronto en otra imposible de bombear. Y si el porcentaje de componentes blandos en los agregados es demasiado alto, puede destruirse por completo la resistencia a la congelación. En lo relativo a la tecnología del hormigón, en términos generales las curvas de distribución de gradación con tamaño máximo de partícula de agregados de 16 mm son buenas, pero en el proceso general de aplicación del hormigón proyectado, los tamaños de partícula de hasta 8 mm presentan ventajas.

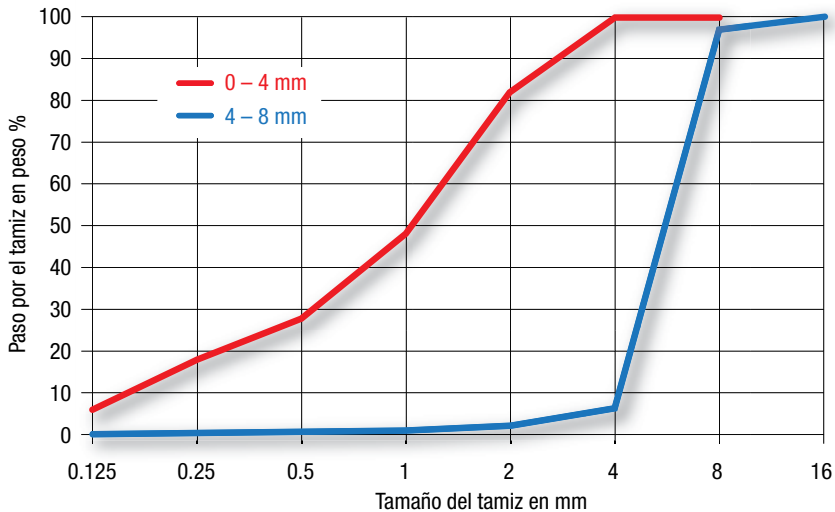


Fig. 4-1: Distribución del tamaño de las partículas de los componentes individuales

4.1.4 CONTENIDO DE FINOS

El contenido de finos consiste en:

- el cemento
- el porcentaje granulométrico de 0 a 0.125 mm de los agregados, y
- cualquier aditivo de hormigón

Actúa como cohesionante en el hormigón fresco para mejorar la trabajabilidad y la retención de agua. El riesgo de separación de la mezcla durante la colocación se reduce y se facilita la compactación. Sin embargo, un contenido de finos demasiado elevado produce un hormigón pastoso y pegajoso. Puede haber también mayor contracción y tendencia al cambio dimensional y alabeo [creeping] (por mayor contenido de agua).

Las siguientes cantidades (color verde) han presentado los mejores resultados:

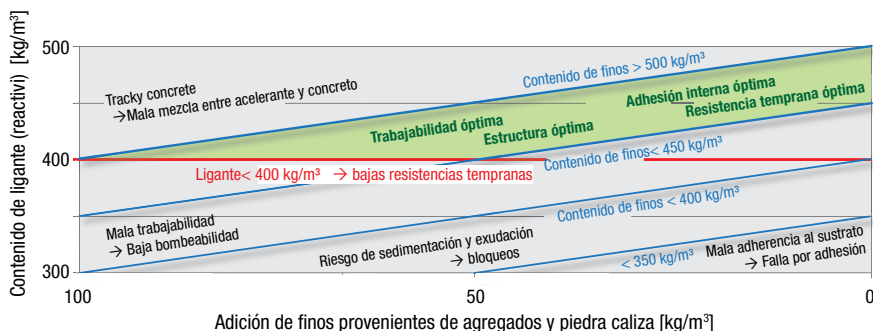


Fig. 4-2: Influencia del contenido de finos en el diseño de la mezcla de hormigón proyectado [shotcrete] (con agregados de 0 - 8 mm)

4.1.5 AGUA

El agua ingresa al hormigón proyectado como agua agregada durante la producción del mismo y como humedad inherente del agregado. La consistencia (plasticidad) de la mezcla es regulada por el agua y los aditivos de hormigón proyectado. El agua de la mezcla no debe incluir componentes que puedan retardar o acelerar la hidratación. Éstos son, principalmente:

- aceite y grasa
- cloruros
- sulfatos
- azúcar
- sal

Normalmente las aguas que escurren en forma natural tales como el agua del subsuelo, las aguas lluvias y el agua de ríos y lagos, son apropiadas. No se debe usar agua de mar por su alto contenido de cloruros. El agua potable generalmente es apropiada para la producción de hormigón proyectado.

4.2 ADITIVOS PARA EL HORMIGÓN PROYECTADO

Los aditivos se emplean para mejorar o modificar las propiedades del hormigón que son imposibles de controlar, o de controlar debidamente, con el cemento, los agregados y el agua. También se agregan aditivos durante el proceso de proyectado para regular el inicio del fraguado. Los aditivos que se agregan al hormigón lo convierten en un complejo sistema de múltiples materiales.

Los aditivos se agregan al hormigón proyectado como porcentaje del peso del cemento o ligante [binder], en un rango aproximado del 0.5% al 7.0%. Esto produce cantidades de 2 hasta 32 kg/m³, en milésimas partes del volumen total del hormigón. Todos los aditivos se le incorporan al hormigón durante su producción en la planta mezcladora, luego de la medición inicial de agua. La principal excepción son los superfluidificantes y acelerantes, que se agregan inmediatamente antes del proyectado.

Tabla 4-3: Especificaciones objetivo para el uso de aditivos con hormigón y mortero proyectado

Especificaciones objetivo para el hormigón proyectado	Parámetros de control	Aditivos de hormigón para lograr los objetivos
Resistencia a la compresión Resistencia a la flexión Durabilidad	Características del fraguado	Aditivos Reductores de agua Refuerzo con fibra Agentes de curado
Bombeabilidad [pumpability] Rociabilidad [sprayability] Configuración de proyectado	Trabajabilidad	Aditivos Estabilizadores de hidratación Reductores de agua
Desarrollo de resistencia [strength]	Fraguado y endurecimiento	Acelerantes de hormigón proyectado Reductores de agua
Tiempo de trabajo	Tiempo abierto	Retardadores de fraguado Retenedores de asentamiento [slump keeper]

4.2.1 ACELERANTE DE FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO PARA HORMIGÓN PROYECTADO (SHOTCRETE)

Química de los acelerantes líquidos libres de álcali

Actualmente los acelerantes líquidos libres de álcali se han convertido en norma en aplicaciones muy exigentes de hormigón proyectado en todo el mundo, debido a sus propiedades benéficas en la aplicación así como para el medio ambiente, la salud y la seguridad industrial (EH&S). Estos productos, basados en soluciones acuosas o suspensiones de compuestos de sulfato de aluminio, resultan fáciles de manejar, como en el caso de las dosis constantes, y aseguran un buen desarrollo de resistencia temprana combinada con propiedades óptimas en el hormigón proyectado.

Con respecto a la expresión “libre de álcalis”, es necesario distinguir entre dos aspectos químicos y el efecto del producto en las propiedades del hormigón proyectado a partir de éstos:

- Alcalinidad (como sinónimo de bases)

El grado base o valor pH de los acelerantes es bajo, generalmente pH 3.0. Esto afecta básicamente la salud y seguridad industrial durante la aplicación, pues los tejidos humanos son más vulnerables a los líquidos altamente alcalinos que a los ácidos débiles. El pH de los acelerantes libres de álcalis está en el rango de los ácidos débiles, es decir, asemeja al de las bebidas gaseosas como la Coca-Cola y los jugos de frutas (pH 2.4 – 3.0).

■ Contenido de iones de álcalis

El contenido de iones álcalis, como el sodio y el potasio, afecta las propiedades del hormigón. Al aumentar el contenido alcalino, la resistencia final del hormigón proyectado se reduce, al igual que su durabilidad.

La química del hormigón proyectado acelerado libre de álcalis

El hormigón proyectado tiene ciertos requisitos muy elevados por su aplicación específica mediante el proyectado: mientras que el hormigón fresco requiere muy buena trabajabilidad, por ejemplo en cuanto a su asentamiento y bombeabilidad, las propiedades del hormigón proyectado son totalmente inversas. Se requiere lograr una resistencia inmediata, para permitir que la aplicación de capas de hormigón aéreas razonablemente espesas sean lo suficientemente fuertes para portar su propio peso. Cualquier retraso en la hidratación del cemento podría producir un colapso retardado de la construcción de hormigón proyectado, debida a otros efectos secundarios tales como el desplazamiento o alabeo [creeping] o la infiltración de agua.

Las propiedades más importantes del hormigón proyectado acelerado, como son el fraguado y endurecimiento temprano, se logran debido a dos reacciones químicas principales inducidas por los acelerantes libres de álcalis (basados en sulfatos e hidroxisulfatos de aluminio). Aunque estas reacciones ocurren principalmente en sucesión, una tras otra, de todas formas ocurre un traslape así como interferencia química entre ellas:

■ Reacción de aluminatos en el hormigón proyectado acelerado libre de álcalis

Inicialmente, comenzando con el acelerante que se mezcla al hormigón justo en la boquilla, se da una muy pronunciada formación de etringita. Esta precipitación de etringita, que se inicia de inmediato durante el curado y dura aproximadamente una hora, forma una matriz inicial sólida lo suficientemente fuerte como para permitir la aplicación del hormigón proyectado. Sin embargo, por razones químicas así como técnicas, la resistencia máxima a la compresión obtenida como resultado de esta reacción primaria con el hormigón proyectado usualmente no sobrepasa los 1.0 a 1.5 MPa.

En vista de los factores que van en detrimento del hormigón proyectado joven, como las fuerzas estáticas (aplicación aérea o "sobre cabeza") o el ingreso de agua, es necesario que después de la ganancia inicial de resistencia ocurra otro proceso de ganancia con hidratación de silicatos como reacción secundaria del hormigón proyectado.

■ Reacción de silicatos en el hormigón proyectado acelerado libre de álcalis

Incluso en el hormigón proyectado fresco con frecuencia se emplean agentes retardantes para lograr trabajabilidad prolongada de la mezcla. Sin embargo, una vez aplicado el retardante al cemento, el retraso en la reacción de hidratación de los silicatos afecta adversamente el desempeño del hormigón proyectado. El segundo efecto que producen los acelerantes libres de álcalis en el curado del hormigón proyectado joven consiste en cancelar el retardo inicial (según lo requiera la trabajabilidad), lo cual produce aún más rápidamente la reacción de los silicatos, comparada con el hormigón fresco.

Otros acelerantes líquidos

Aparte del estado actual de la última tecnología de acelerantes descrita arriba, que emplea acelerantes libres de álcalis, existen otros tipos de acelerantes líquidos que se usan en muchos países. Por ejemplo, los que se basan en silicato acuoso o soluciones de aluminato. Estos acelerantes no están libres de álcalis, lo que significa que llevan cantidades significativamente altas de iones de álcalis y son líquidos alcalinos con un pH muy alto, superior a pH 11. Las interacciones químicas que se dan en el hormigón proyectado cuando se usan estos acelerantes son diferentes a las descritas arriba, que aplican para los acelerantes libres de álcalis. Aparte de estas diferencias, el empleo de acelerantes que no están libres de álcalis en el hormigón proyectado produce efectos negativos de seguridad industrial durante la aplicación, y en la durabilidad del hormigón proyectado. Debido a su alta alcalinidad (pH), estos productos presentan peligro de quemaduras en tejidos humanos, tales como los ojos. Esto es válido tanto para el contacto directo (con piel y ojos) como para los aerosoles, pues los aerosoles de estos acelerantes afectan negativamente la respiración (pulmones). Incluso si estos acelerantes rinden bien en cuanto a un desarrollo razonable de resistencia temprana, afectan negativamente las siguientes propiedades finales del hormigón: se reduce significativamente la resistencia final y la infiltración de agua fácilmente produce un lixiviado al pasar por el hormigón. Este último aspecto genera aún más problemas en los sistemas de drenaje, los cuales rápidamente se taponan por la acción de dicho lixiviado. La durabilidad también puede ser un problema por las grandes cantidades de iones de álcalis que introduce el acelerante, y el riesgo de una reacción álcali-silicatos aumenta en este hormigón proyectado.

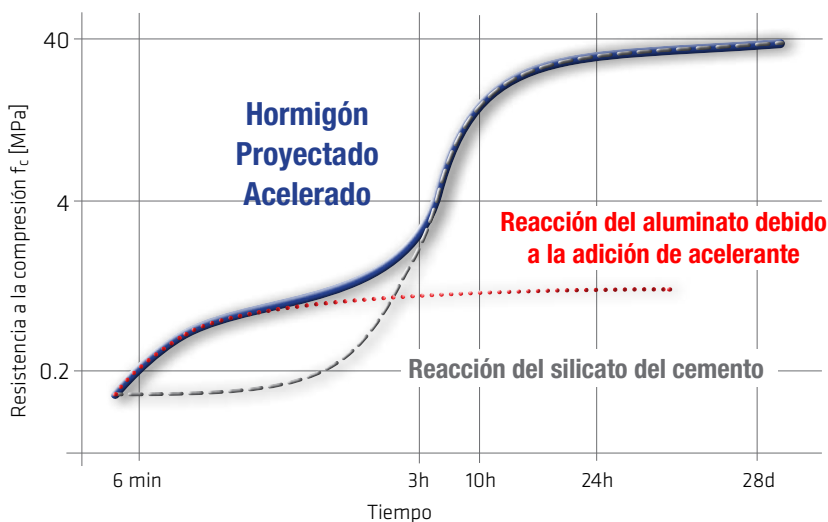


Fig. 4-4: Interacción de la reacción álcali-aluminatos

Tabla 4-4: Tipos de acelerantes y sus principales propiedades

Propiedades	Tipo de acelerante		
	Alcalino. Basado en aluminatos	Alcalino. Basado en silicatos	Sin álcalis
Rango de la dosis	3 – 6 %	12 – 15 %	4 – 7 %
pH	13 – 14	12 – 13	3
Equivalente a Na ₂ O	20 %	12 %	<1 %
Resistencia muy temprana a la misma dosis	++++	++++	++
Resistencia Final	+	--	+++
Estanqueidad (impermeabilidad)	++	--	+++
Comportamiento de lixiviación	---	--	-
Salud ocupacional	---	-	+++
Salud ocupacional y del transporte	--	-	+++

+ mejora

- deterioro

Tabla 4-5: Tipos de Sigunit® y sus principales usos

Tipo	Producto	Uso / Efecto	Comentarios
Acelerante líquido libre de álcalis para el hormigón proyectado [shotcrete]	Sigunit®-L AF	<ul style="list-style-type: none"> Estabilización de cabezal en constr de túneles Estabilización de roca y talud Revestimiento de hormigón proyectado de alta calidad Alto grado de resistencia temprana Mayor impermeabilización Menor cantidad de eluido Mejor salud y seg industrial 	<ul style="list-style-type: none"> Para proceso de proyectado seco o húmedo Poca reducción final de resistencia comp con el hormigón no acelerado original No es compatible con los acelerantes alcalinos Las piezas metálicas que están en contacto con este acelerante deben ser de acero inoxidable
Polvo acelerante sin álcalis p/el hormigón proyectado	Sigunit®-AF		
Líquido acelerante alcalino para el hormigón proyectado	Sigunit®-L	<ul style="list-style-type: none"> Estabilización de cabezal en construcción de túneles Estabilización de roca y talud Alto grado de resistencia temprana Menor rebote Puede lanzarse sobre sustrato húmedo 	<ul style="list-style-type: none"> Para proceso de proyectado seco o húmedo Reducción final resistencia comp con el hormigón no acelerado original Agresivo para los tejidos humanos
Polvo acelerante alcalino para el hormigón proyectado	Sigunit®		

De la tabla anterior se desprende que únicamente se debe usar acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis para obtener un hormigón proyectado durable y de alta calidad, tomando en cuenta la seguridad del equipo encargado del proyectado. Los acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis ofrecen mayor seguridad industrial y física en muchas áreas:

■ **Trabajo seguro:**

Debido a su valor de pH de aproximadamente 3, no se producen vapores de agua cáusticos ni aerosoles cáusticos en el aire del túnel y por lo tanto no hay lesiones en piel, membranas mucosas y ojos.

■ **Medio ambiente seguro:**

Con los acelerantes libres de álcalis, no se descargan aditivos altamente alcalinos al suelo y al agua de los drenajes.

■ **Manejo seguro:**

Los acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis no constituyen un peligro para el transporte, el almacenamiento, la decantación y la dosificación.

■ **Se asegura la calidad del hormigón:**

El uso de los acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis minimiza los efectos negativos del endurecimiento del hormigón y mejora su compactación [tightness] y por lo tanto su durabilidad.

■ **Deshechos seguros:**

Los acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis no introducen ningún álcali soluble en el hormigón, lo que reduce grandemente el riesgo de infiltración en drenajes.

■ Los acelerantes se definen como libres de álcalis si el contenido equivalente de álcalis en el peso del acelerante es $\leq 1\%$.

■ Los productos se definen como bases si su pH está entre 7 y 14.

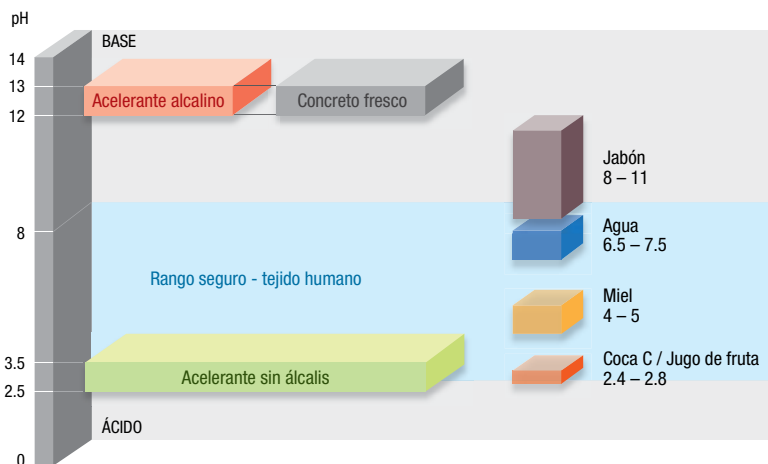


Fig. 4-5: Rango de pH de los acelerantes del hormigón proyectado

4.2.2 REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO (HRWR - HIGH-RANGE WATER REDUCERS)

Conjuntamente con los acelerantes de hormigón proyectado, los reductores de alto rango [high-range water reducers] (superplastificantes) son el aditivo de hormigón más importante del hormigón proyectado húmedo. Para usar los acelerantes del hormigón proyectado en forma efectiva, se debe limitar el contenido de agua del hormigón fresco. La máxima relación agua-ligante (w/b) [water-binder ratio] generalmente está definida como de 0.50, pero resulta mejor en desempeño y calidad una relación w/c máxima por debajo de 0.48.

Tabla 4-6: Cálculo del contenido de agua

Relación Agua / Ligante [Water / Binder Ratio]	Ejemplo I	Ejemplo II
Valor máximo: 0.50	425 kg/m ³ CEM I 42.5 → 212.5 litros/m ³	300 kg/m ³ CEM I 42.5 & 125 kg/m ³ cenizas volantes (k=0.4) → 175 litros/m ³
Valor máximo: 0.46	425 kg/m ³ CEM I 42.5 → 195.5 litros/m ³	300 kg/m ³ CEM I 42.5 & 125 kg/m ³ cenizas volantes (k=0.4) → 161 litros/m ³

Los reductores de agua de alto rango afectan además el tiempo de trabajabilidad y la cohesión interna del hormigón fresco, y por lo tanto afectan también las propiedades generales del mismo. La composición de los reductores de agua también influye sobre el efecto que producen los acelerantes del hormigón proyectado. Todas las demás propiedades que se mencionan a continuación las determina predominantemente la formulación del hormigón, y éstas a su vez son afectadas y controladas por los reductores de agua. Los principales requisitos de los reductores de agua de alto rango que se usan con el hormigón proyectado se pueden resumir de la siguiente manera:

Reducción de agua

- Lograr la fluidez [flowability] requerida cuando el contenido de agua del hormigón fresco se ha reducido sustancialmente. Consistencia ideal del hormigón fresco: [ensayo de] flujo de expansión [flow table spread] de 550 a 650 mm.

Tiempo de trabajabilidad [Workability time]

- La consistencia del hormigón fresco debe permanecer constante durante todo el tiempo de trabajo: el bombeo, específicamente, requiere una consistencia blanda.

Bombeabilidad [pumpability]

- Una baja viscosidad (suavidad) promueve tanto buena bombeabilidad como una mezcla homogénea del acelerante (Sigunit) en el hormigón, en el transformador de flujo en la boquilla.

Compatibilidad

- La naturaleza y los efectos que producen los reductores de agua de alto rango, los acelerantes del hormigón proyectado y cualquier otro aditivo empleado en el hormigón, deben ser todos compatibles. Por lo tanto estas combinaciones deben probarse de antemano y contar con la aprobación del fabricante de los aditivos y del hormigón. Una combinación efectuada al azar de distintos productos y mezclas puede producir resultados altamente insatisfactorios.

En términos de la tecnología del hormigón, las tecnologías alternativas relativas a los materiales reductores de agua de alto rango se diferencian según su desempeño e idoneidad como agentes reductores de agua:

Reductores de agua [Water Reducers] (WR)

- Su limitada capacidad de reducción de agua (5 - 10 %), al igual que su composición química, con frecuencia hace que los WR resulten inapropiados para el hormigón proyectado.

Reductores de agua de alto rango [High-Range Water Reducers] (HRWR)

- Existen dos tecnologías de HRWR, que son:
 Las del tipo Naftaleno (SNF) y Melamina (SMF), caracterizadas por una buena reducción de agua y sobresaliente compatibilidad, que permiten combinarlas con los acelerantes usados con el hormigón proyectado. Sin embargo, la posibilidad de extender los tiempos de trabajabilidad y sus capacidades máximas de reducción de agua, son limitadas.
 La nueva generación de Policarboxilatos (PCE) se caracteriza por un desempeño óptimo en la reducción de agua y además permiten extender casi ilimitadamente el tiempo de trabajabilidad. La interacción entre este tipo de reductores de agua de alto rango y los acelerantes del hormigón proyectado es considerablemente más compleja, y por lo tanto la compatibilidad y correspondencia de estos productos deben verificarse específicamente.

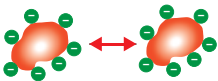
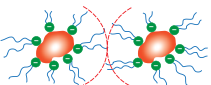
Tipo reductor de agua	Base química	Potencial de reducción de agua	Efecto
WR - Reductor de agua	Carbohidrato / Sulfonato de lignina	5 - 10 %	Fuerzas electroestáticas: 
HRWR - Reductor de agua de alto rango	Naftaleno (SNF) y Melamina (SMF)	5 - 25 %	
	Policarboxilato (PCE)	10 - 40 %	Repulsión estérica: 

Tabla 4-7: Tipos de reductores de agua

Características y ventajas de la tecnología de éter de policarboxilato (PCE)

La principal característica de la tecnología de superplastificante basada en el éter de policarboxilato es su diseño deliberado en polímeros dirigido a lograr ciertas propiedades específicas en el hormigón.

El primer componente – espina dorsal de grupos de carboxilo– es responsable del logro alcanzable de reducción de agua / asentamiento inicial y tiempo de mezcla, respectivamente. El segundo componente –las cadenas laterales– determina la capacidad de retener el asentamiento del superplastificante, al verse afectado por un número cada vez mayor de cadenas laterales. El factor clave es el espacio limitado para los grupos de carboxilos y las cadenas laterales a lo largo de la espina dorsal. A una ubicación dada pueden ligarse un grupo carboxilo o una cadena lateral. Esto conduce al limitante tecnológico de que existen esencialmente tres tipos distintos de polímeros: reductores de agua, controladores de asentamiento y los de retención de asentamiento.

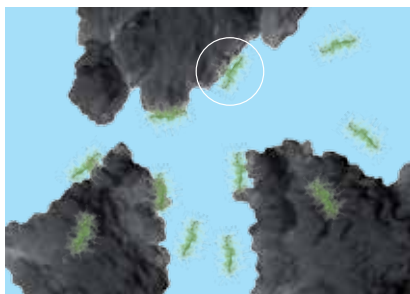


Fig. 4-6: Absorción del polímero (backbone) en el grano de cemento

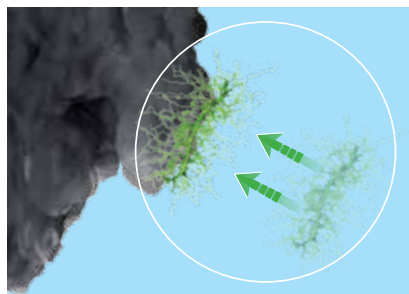


Fig. 4-7: Detalle de la absorción del polímero (backbone) en el grano de cemento

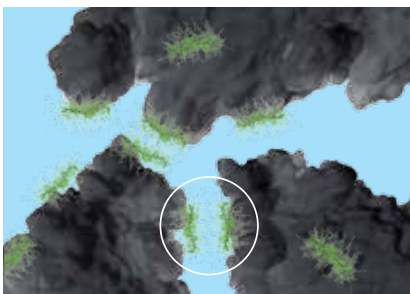


Fig. 4-8: Trabajabilidad mejorada debido a impedimento estérico

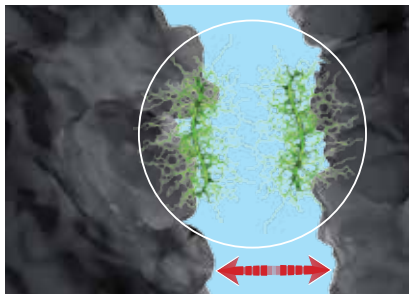


Fig. 4-9: Detalle de la trabajabilidad mejorada debido al impedimento estérico

4.2.3 ESTABILIZADORES DE CONSISTENCIA / RETARDADORES DE FRAGUADO

El hormigón proyectado se usa principalmente en túneles y en minería, en donde también se presentan importantes retos logísticos, por lo cual (por ejemplo) los tiempos de trabajabilidad del hormigón deben ser los más flexibles. Esto se logra de manera efectiva con el hormigón proyectado debido a que el inicio y la velocidad de hidratación se pueden controlar independientemente mediante el acelerante que se agrega en la boquilla. Ello permite como resultado extender la trabajabilidad durante muchas horas, de forma que las demás operaciones logísticas, tales como la producción de hormigón, el transporte, los tiempos de espera, la instalación y las interrupciones, también se pueden planificar y controlar adecuadamente.

SikaTard®-930

Los estabilizadores de la consistencia del hormigón proyectado tales como el SikaTard®-930 permiten seleccionar prácticamente cualquier tiempo de trabajabilidad para el hormigón fresco. El efecto específico logrado con respecto al tiempo también depende del lote, tipo de cemento, contenido de ligante, contenido de agua y condiciones de temperatura.

Tabla 4-8: Extensión de los tiempos de trabajabilidad mediante la adición de SikaTard®-930

Tiempo de trabajabilidad requerido	Producto	Dosis recomendada para el cemento
1 a 3 horas	Sika® ViscoCrete®-SC	Dependiendo de la relación a/c requerida: 0.8 - 1.5 %
4 horas	Sika® ViscoCrete®-SC SikaTard®-930	0.8 - 1.5 % 0.2 - 0.4 %
8 horas	Sika® ViscoCrete®-SC SikaTard®-930	0.8 - 1.5 % 0.4 - 0.6 %
12 horas	Sika® ViscoCrete®-SC SikaTard®-930	0.8 - 1.5 % 0.6 - 0.8 %

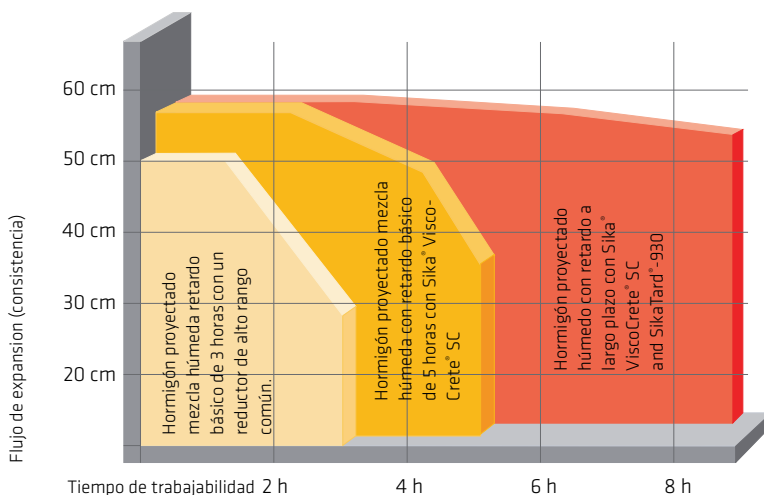


Fig. 4-10: Tiempo de trabajabilidad de mezclas húmedas de hormigón proyectado

4.2.4 ESTABILIZADORES DE MEZCLA

La suavidad y bombeabilidad son los dos criterios clave empleados en la evaluación del hormigón fresco para aplicaciones de hormigón proyectado.

Suavidad [Softness]

No debe confundirse la suavidad del hormigón con su fluidez. La suavidad define la viscosidad del hormigón fresco. Entre más suave sea el hormigón, más fácil y más completamente podrá descomponerse en el transformador de flujo ubicado en la boquilla, y más homogénea y por tanto más eficientemente podrá inyectarse y dispersarse en él, el acelerante de fraguado.

Fluidez [Flowability]

La fluidez influye también sobre la capacidad de llenado para el transporte en contenedores o mezcladoras, pero aún más importante, en el grado de llenado que se puede alcanzar en los cilindros de las bombas de hormigón en la fase de alimentación, y por lo tanto, en la eficiencia del bombeo.

Bombeabilidad (manejabilidad para el bombeo) [Pumpability]

Las dos propiedades (suavidad y fluidez) son esenciales para evaluar la “bombeabilidad” del hormigón. Primero que todo por la tasa de descarga y luego por los requerimientos de energía del bombeo.

Para controlar las propiedades del hormigón fresco, se pueden agregar aditivos especiales para controlar la fluidez, suavidad y bombeabilidad del hormigón, además de la correcta formulación del mismo. El objetivo de todas estas medidas es siempre el de poder optimizar la estabilidad de la mezcla.

Contenido de finos

Un contenido de finos ≤ 0.125 mm por kg/m^3 y el volumen del contenido de finos en l/m^3 son factores determinantes. El contenido mínimo requerido depende del método de entrega así como de la distancia, el tamaño máximo de los granos y el tipo de agregados empleados (redondos o triturados).

Sika® Stabilizer

Los estabilizadores tales como el **Sika® Stabilizer** mejoran la cohesión interna de las mezclas de hormigón y producen una mezcla más estable y homogénea. Se emplean principalmente cuando el hormigón fresco tiende a separarse o segregarse y no es posible mejorarlo mediante una mayor optimización del diseño de la mezcla.

SikaPump®

Como el nombre lo sugiere, los agentes de bombeo tales como el **SikaPump®** se emplean para mejorar la bombeabilidad en el proceso de proyectado húmedo de flujo denso [dense-flow wet spray process]. Al igual que mejorar la bombeabilidad de las mezclas, aumentan la "lubricación" de la tubería y por lo tanto mejoran también la continuidad, mientras que reducen la energía y la presión requeridas.

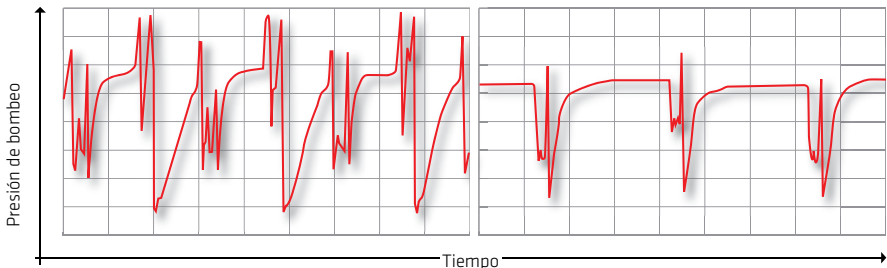


Fig. 4-11: Sin SikaPump®:
Presión de bombeo inconstante

Fig. 4-12: Con SikaPump®:
Presión de bombeo constante

Tabla 4-9: Resumen de los aditivos empleados en el hormigón proyectado

Tipo	Producto	Uso / Efecto	Comentarios
Acelerante	Sigunit®	Colocación de hormigón sin emplear moldes o encofrados	Se agrega en la boquilla
Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	<ul style="list-style-type: none"> • Alto nivel reducción de agua • Mayor trabajabilidad • Controla tiempo trabajabilidad • Rápido aumento resistencia • Mejores propiedades de contracción y alabeo • Mayor impermeabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Efecto óptimo al agregarse después del agua de mezcla • Dosis óptima depende del tipo de cemento • Para propiedades específicas es esencial hacer pruebas preliminares con el cemento y agregados a usar
Retardante	SikaTard®	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajabilidad ajustable • No hay que limpiar bombas y mangueras durante la fase de retardo 	
Humos de sílice	SikaFume®	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor homogeneidad en el hormigón fresco • Mayor impermeabilidad • Mayor adherencia entre agregado y cemento endurecido • Elevada resistencia a la congelación y deshielo • Menor rebote 	<ul style="list-style-type: none"> • Se agrega en la planta de conformación de lotes [batching plant] • Requiere un curado óptimo porque los humos de sílice rápidamente secan la superficie del hormigón
Agente de bombeo y estabilizador	SikaPump® Sika®Stabilizer	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora homogeneidad y cohesión interna en mezclas de hormigón no idóneas • Aumenta productividad del proyectado x menor consumo energía, aún en mezclas con agregados triturados 	Agregarlo aumenta la potencia de la mezcladora y la consistencia del hormigón
Lubricante	SikaPump®	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce resistencia a la fricción de mangueras, tubos • Reemplaza lechada de cemento como agente de arranque de la bomba 	No se debe lanzar la mezcla lubricante en el área de aplicación

5 REQUERIMIENTOS DEL HORMIGÓN PROYECTADO

Este capítulo describe todos los requerimientos del hormigón y mortero proyectado de manera sencilla y fácil de entender. Al contar con esta información, se pueden seleccionar los materiales correctamente. Básicamente, se trata de elegir entre los procesos de proyectado húmedo o seco, el diseño correcto de la mezcla y la ponderación del desarrollo y durabilidad de la resistencia temprana del material proyectado conforme a los requerimientos.

5.1 DESARROLLO DE RESISTENCIA TEMPRANA

Deben cumplirse diferentes requerimientos de desarrollo de resistencia temprana que dependen en gran parte del punto de uso del hormigón proyectado o mortero. Se dividen en:

- desarrollo de resistencia muy temprana entre pocos minutos y 1 hora
- desarrollo de resistencia temprana entre 1 hora y max. 1 día

Después de los tiempos anteriores se requiere desarrollar una resistencia normal comparable a la del hormigón estructural. El desarrollo de resistencia es afectado por los mismos factores:

- tipo de agregado
- tipo y contenido de cemento
- contenido de agua
- temperaturas del hormigón y el medio ambiente (sustrato y ambiente)
- espesor de la capa
- Con el hormigón proyectado se agrega además la fuerte influencia del acelerante, cuyo propósito es elevar marcadamente la resistencia, desde los primeros minutos hasta las primeras horas.

El hormigón proyectado se usa principalmente para estabilizar y con frecuencia para rellenar cavidades. El desarrollo de resistencia muy temprana y temprana es fundamental para sostener roca y suelo y al requerirse proyectado sobre cabeza, lo que por lo general se especifica.

Desarrollo de resistencia muy temprana

Durante los primeros minutos luego de aplicarse el hormigón proyectado, la fuerza de adhesión es decisiva. La dosificación precisa de la cantidad de aire es muy importante aquí, porque determina la proporción de aplicación (espesor). Si no hay suficiente aire la compactación del hormigón será deficiente, lo que a su vez afectará negativamente la resistencia del material proyectado. Demasiado aire produce mucho polvo y mucha pérdida por rebote.

Las partículas finas de cemento y acelerante que se pierden con el polvo son componentes importantes que hacen falta para el desarrollo de una resistencia óptima. La emisión de polvo debe evitarse en lo posible por razones de higiene del trabajo (protección de la salud). En todo caso, no es posible aplicar más hormigón proyectado del que el sustrato pueda absorber, aún como resistencia inicial a la tensión en la superficie. El desarrollo de resistencia muy temprana determina la velocidad de avance y por ende el desempeño del contratista.

Desarrollo de resistencia temprana

Se obtiene una resistencia a la compresión medible luego de aproximadamente una (1) hora (en casos especiales o en la estabilización inmediata luego de tan sólo pocos minutos). El desarrollo de esta resistencia determina cuándo puede continuar avanzando el frente o cabezal [heading] y también el progreso en la construcción del túnel.

5.2 RESISTENCIA FINAL

Además del desarrollo de resistencia muy temprana así como resistencia temprana que se requieren específicamente para el hormigón proyectado, existen requerimientos mecánicos para el hormigón proyectado endurecido, igual que para el hormigón convencional, generalmente después de 28 días. El nivel de resistencia se basa en la ingeniería de los requerimientos de diseño. La resistencia a la compresión se mide en núcleos tomados de la estructura o de paneles proyectados. Algunas veces se usan como control muestras cúbicas de la base de hormigón, pero no pueden dar resultados significativos para la aplicación de hormigón proyectado porque las características pueden cambiar considerablemente con el proceso de proyectado. El acelerante de hormigón proyectado usado y la habilidad del operador afectan sustancialmente la resistencia final obtenida. El hormigón proyectado se diseña como una capa delgada portadora de carga y por lo tanto debe tener propiedades dúctiles de resistencia al peso. Lo anterior se puede obtener mediante una malla de refuerzo, pero el uso de fibras para reforzar hormigón y mortero proyectado es ideal para el moldeado flexible del material. El hormigón proyectado reforzado con fibra de acero es un material con alta capacidad de carga.

Las propiedades del hormigón proyectado se prueban en muestras tomadas directamente de la estructura o de paneles proyectados paralelamente a la aplicación bajo condiciones de similitud máxima y sin destruir la estructura. También se usan paneles proyectados con dimensiones definidas para la prueba de placa que determina las resistencias a la tracción y ductilidad del hormigón proyectado reforzado.

Tabla 5-1: Resistencias a la compresión finales según SN 531 198 (Suiza)

Hormigón proyectado Tipo SC	Clase de resistencia a la compresión	Tipo de exposición	Áreas recomendadas de aplicación
SC 1	C16/20	X0	Llenado de fisuras y cavidades de unión
SC 2	C25/30	X0	Soporte inmediato
SC 3	C25/30	XA1, XD1	Capas posteriores de soporte temporal; respectivamente, primera capa, si no hay requerimiento especiales de soporte inmediato
SC 4	C30/37	XA1, XD1	Soporte temporal de revestimiento de cubierta sencilla, reforzado
SC 5	C30/37	XA2, XD1	
SC 6	C30/37	XA1, XD1, XC3, XF3	Revestimiento de cubierta sencilla, reforzado o sin refuerzo
SC 7	C35/45	XA1, XD3, XC3, XF4	

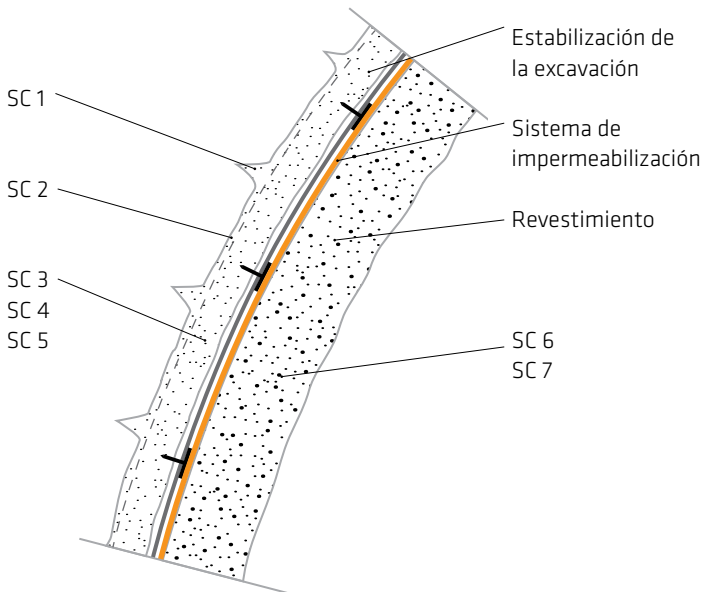


Fig. 5-1: Tipos de hormigón proyectado según SN 531 198 (Suiza)

5.3 HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRA

El hormigón proyectado reforzado con fibra ha cobrado más importancia debido al desarrollo de nuevos y más eficaces tipos de fibra, su mayor disponibilidad y su inclusión en diferentes estándares. Puede considerarse la combinación perfecta con el hormigón proyectado. Igual que el hormigón convencional, el hormigón proyectado es un material frágil con resistencia a la tensión limitada y doblaje limitado, pero muy buena resistencia a la compresión. Es un hecho que es posible reforzar el hormigón proyectado con acero convencional pero su instalación es muy laboriosa, consume tiempo y aún con frecuencia implica situaciones críticas de seguridad. Además, las barras de refuerzo todavía no están bien adaptadas al diseño de grosor flexible de la capa de hormigón proyectado. Por lo que tiene sentido usar hormigón proyectado reforzado. Sus ventajas son:

Tabla 5-2: Tipo de fibras y sus propiedades

Propiedades	Tipo de fibras		
	Micro Fibras sintéticas Ø < 0.30 mm	Macro Fibras sintéticas Ø > 0.30 mm	Fibras de acero
Mejora la cohesión (exudación)	x		
Reduce el agrietamiento por asentamiento plástico	x		
Reduce el agrietamiento por retracción plástica	x		
Aumenta la resistencia al impacto y abrasión	x		
Aumenta la resistencia al astillamiento / fragmentación	x		
Reduce la permeabilidad	x		
Aumenta la resistencia al astillamiento por explosión (fuego)	x		
Controla el agrietamiento a largo plazo		x	x
Aumenta la resistencia a la fatiga y al impacto		x	x
Mejora la ductilidad post agrietamiento (absorción de energía)		x	x



Fig. 5-2: Buena distribución de fibras en el hormigón



Fig. 5-3: Fibras de acero para mejorar la absorción de energía del hormigón

En principio, todos los tipos de fibras y materiales son aptos para el hormigón proyectado. Cuando el material se usa en construcción de túneles, por lo general la fibra de acero es la más apropiada. La fibra de carbón posee propiedades ideales pero no resulta nada económica con el hormigón proyectado convencional. La fibra de vidrio es sólo apta para aplicaciones especiales de partícula fina y debe cumplir requerimientos especiales para su comportamiento a largo plazo. Las fibras de polímero se usan principalmente para reparaciones de hormigón porque mejoran la cohesión interior del hormigón proyectado y reducen el agrietamiento por retracción durante el desarrollo de resistencia temprana. La fibra plástica mejora la resistencia al fuego del hormigón en general. Están apareciendo generaciones modernas de fibras plásticas en las aplicaciones tradicionales de fibra de acero.

La fibra de acero sobrepasa las barras y mallas de refuerzo en costos y resultados casi siempre. Estas pautas aplican en la producción de hormigón proyectado reforzado con fibra:

- La consistencia del hormigón fresco debe ser más plástico para poder bombear el hormigón proyectado.
- Debido a las grandes superficies, el requerimiento de película lubricante y adhesiva es mayor y por lo tanto debe aumentarse el contenido de ligante [binder].
- Las propiedades adhesivas mejoran con el uso de humos de sílice.

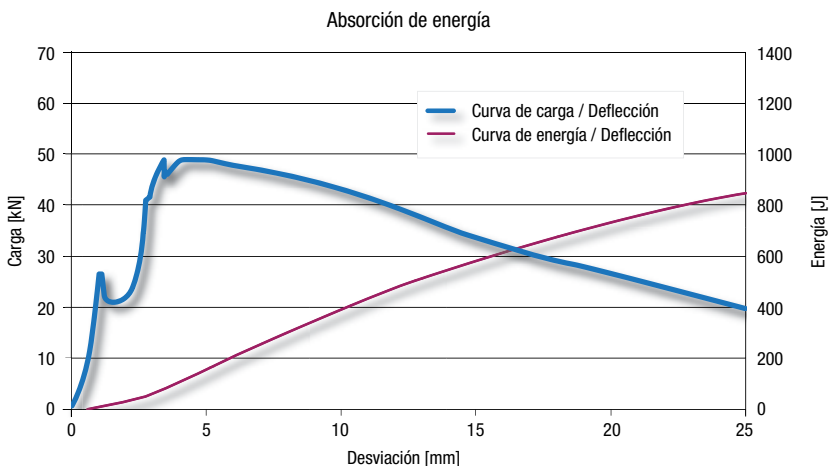


Fig. 5-4: Curva de carga/deflexión del hormigón proyectado EN 14488-5 reforzado con fibra de acero

- El punto propicio para agregar la fibra depende del tipo de fibra y puede cambiarse si se presentan problemas (por ejemplo, formación tipo “hedgehog” [espacios sin fibra al lado de espacios con aglomeraciones de fibra]).
- Se debe recordar que también se pierden fibras por rebote, así que el contenido y la eficacia del hormigón proyectado son los factores determinantes, y no la dosis teórica de fibra de acero.

Tabla 5-3: Clases de absorción de energía según EN 14487-1

Clase absorción de energía	Absorción de energía en Joules [J] para desviación hasta de 25 mm	Aplicación según terreno / roca
E500	500	'firme'
E700	700	'medio'
E1000	1000	'difícil'



Fig. 5-5: Prueba de absorción de energía de hormigón proyectado reforzado con fibra según EN 14488-5

5.4 HORMIGÓN PROYECTADO CON MAYOR RESISTENCIA AL FUEGO

La mayor resistencia del hormigón y mortero proyectados puede mejorarse mediante fórmulas de mezcla complejas. Habitualmente estos materiales se suministran como mezclas listas de morteros y son muy costosas. Es entonces posible cumplir de forma virtual toda especificación de resistencia al fuego. Para obtener tales fórmulas se deben seleccionar todos los componentes por su resistencia al fuego lo que resulta en soluciones específicas para cada agregado.

Sin embargo, la resistencia al fuego además puede mejorarse considerablemente a bajo costo incluyendo una capa superficial de sacrificio. Al adicionar una fibra plástica especial (polipropileno), la temperatura baja y se puede asegurar una capa superficial de sacrificio que debe remplazarse después del fuego.

Fig. 5-6: Las altas temperaturas destruyen el hormigón desprotegido

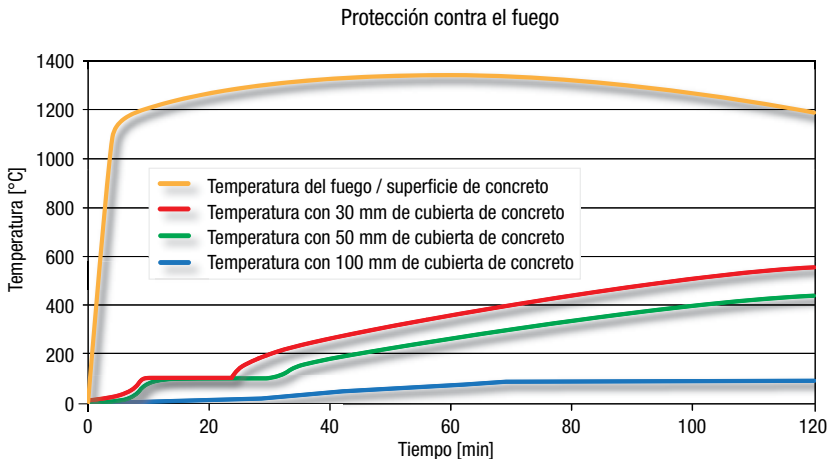


Fig. 5-7: Prueba con fuego del hormigón proyectado resistente al fuego

5.5 DURABILIDAD

La cantidad de agua en una mezcla afecta de gran manera todas las propiedades del hormigón endurecido y es el factor principal de durabilidad. Asimismo, en el hormigón proyectado, entre menos contenido de agua en la mezcla, mayor durabilidad del material, pero sólo si se combina con un curado adecuado. La medida para el análisis es la relación agua-cemento o agua-ligante. La relación se afecta principalmente por el agregado y debe considerarse la piedra disponible cuando se especifican los límites del contenido de agua.

- relación agua / cemento ≤ 0.55 para hormigón con especificación baja
- relación agua / cemento ≤ 0.50 para hormigón con especificación promedio
- relación agua / cemento ≤ 0.46 para hormigón con especificación alta

Junto con el contenido de agua, los agregados y el ligante [binder] afectan de forma natural la durabilidad. El hormigón proyectado también se afecta por el fraguado muy temprano o temprano, lo que usualmente se controla con un acelerante de hormigón proyectado o cemento especial. Los acelerantes de hormigón proyectado tradicionales reducen la resistencia final. Esta es otra razón para preferir el uso de acelerantes libres de álcalis o alcalinos para la producción de hormigón proyectado durable. El uso de humos de sílice también provee compactación adicional de la micro-estructura de hormigón y aumenta la resistencia adhesiva entre el agregado y la matriz de cemento endurecida. Ambas mejoran notablemente la durabilidad. El hormigón proyectado bien formulado puede cumplir todos los requerimientos de durabilidad igual que el hormigón tradicional.

Así como ocurre con el hormigón colocado de forma convencional, ocurre también con el hormigón proyectado: el hormigón proyectado final es tan bueno como lo es su curado. No obstante, el proceso de curado es mucho más difícil, principalmente porque el secado y las sequías actúan sobre la superficie del hormigón proyectado durante las primeras horas, cuando el hormigón formado es protegido por el encofrado. Mojar frecuentemente la superficie ayuda, pero en la práctica es difícil realizar esto en el tramo del túnel. Por ejemplo, cubrir con una máquina portátil de curado es también difícil en las construcciones con hormigón proyectado. Pueden agregarse productos conocidos como agentes internos de curado al hormigón proyectado durante la fase de producción, que cuando se integran cumplen la función de curado.

Tabla 5-2: Medidas para cambiar las características del hormigón proyectado y lograr alta durabilidad

Parámetro objetivo	Medida	Producto
Aumentar resistencia a la compresión	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir contenido agua • Usar humos de sílice 	Sika®ViscoCrete® SC SikaFume®
Mejorar impermeabilización	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir contenido de agua • Usar humos de sílice 	Sika®ViscoCrete® SC SikaFume® Sika®WT-100
Aumentar la resistencia a la congelación	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir contenido de agua • Usar humos de sílice 	Sika®ViscoCrete® SC SikaFume® Sika®WT-100
Aumentar la resistencia a sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir contenido de agua • Usar cemento resistente a sulfatos y/o humos de sílice • Usar dosis mínima de acelerante 	Sika®ViscoCrete® SC SikaFume® Sigunit®-L AF
Aumentar la resistencia ASR (Reacción alcalisilice).	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir contenido agua • Usar adherente de bajo equivalente de Na₂O • Usar agregado bajo potencial de ASR • Usar dosis mínima de acelerante 	Sika®ViscoCrete® SC Sigunit®-L AF

Como en toda actividad humana, la calidad del hormigón proyectado instalado es determinada en gran parte por las personas, en este caso, el operador de la boquilla y el supervisor. Ninguna de las medidas preliminares puede lograr sus objetivos a no ser que sean implementadas correctamente en el sitio. Pero se deben brindar a los operarios condiciones adecuadas para trabajar.

6 HORMIGÓN PROYECTADO HUMEDO

Se entiende por hormigón proyectado húmedo, la entrega (manejo) de una mezcla lista de agregado, cemento, agua y aditivos de hormigón proyectado en una mezcla trabajable. Para lanzar, se mezcla el hormigón proyectado húmedo con aire y acelerantes de hormigón proyectado y luego se aplica. El hormigón proyectado se puede procesar por los métodos de flujo denso o flujo diluido. El hormigón proyectado por el método de flujo denso es el proceso más moderno de alto rendimiento.

6.1 USOS

El hormigón proyectado se usa siempre que se especifica hormigón de alta calidad y alto volumen. Este proceso es el más popular en la construcción mecánica de túneles. ¡En últimas el proceso seleccionado lo determinan las preferencias del contratista!

Las principales aplicaciones del proceso de hormigón proyectado son:

- opera con alta capacidad de volumen
- permite mejorar notablemente las condiciones de trabajo en el área de proyectado
- logra alta durabilidad porque controla la cantidad de agua de mezcla

6.2 VENTAJAS

Las ventajas del proceso de proyectado húmedo cubren diferentes áreas. El de hormigón proyectado es el método más moderno y eficaz.

- alto volumen de proyectado hasta de 25 m³/h en unos casos
- el nivel de rebote se reduce por un factor de dos a cuatro
- las condiciones de trabajo se mejoran notoriamente por menor generación de polvo
- reducción de costos de desgaste del equipo de proyectado
- se requiere poca cantidad de aire durante el proyectado
- mejor calidad del hormigón proyectado instalado (contenido constante de agua)

El proceso de hormigón proyectado por flujo denso requiere más trabajo al comienzo (arranque) y al final (limpieza) que el proceso de proyectado seco. También se predetermina el tiempo durante la producción y el hormigón proyectado debe aplicarse en ese tiempo para evitar desperdicio de hormigón.

6.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DEL HORMIGÓN PROYECTADO HÚMEDO

El diseño de la mezcla de hormigón proyectado húmedo depende de los requerimientos especificados y la trabajabilidad esperada es decir los siguientes parámetros:

- las especificaciones objetivo del hormigón (resistencia a la compresión / durabilidad)
- el concepto de logística a usarse (métodos de manejo / condiciones de temperatura)
- condiciones especificadas del material instalado (desarrollo de resistencia muy temprana así como temprana)
- los aspectos económicos de la mezcla de hormigón proyectado húmedo

Es como resultado de todos estos parámetros que el tipo y contenido de cemento, tipo y gradación del agregado, contenido y tipo de agua y cantidad de los aditivos del hormigón proyectado, se seleccionan y confirman mediante pruebas o se adaptan después de evaluar los parámetros objetivo. Las fórmulas típicas del hormigón proyectado húmedo se detallan abajo.

El factor principal de elección de la curva de graduación del tamaño de las partículas del agregado es el agregado que hay disponible localmente. La curva que mejor cumple con los requerimientos enunciados se establece por prueba y experimentación del material granulado disponible. Reemplazar el agregado es una opción sólo en casos excepcionales por razones económicas (transporte de grandes cantidades). Los siguientes diagramas dan ejemplos de definición de la curva de graduación basados en la preselección de los componentes.

Tabla 6-1: Componentes del hormigón proyectado y sus efectos

Ingredientes	Tipo	Monto [kg/m ³]	Efecto
Ligante	Cemento	400	Es el 'ligante' de la matriz de hormigón Desarrollo de alta resistencia Buena bombeabilidad Se liga con el sustrato después de proyectado
Agua	Sin contaminantes	192	Proceso de hidratación Buena bombeabilidad
Agregados	0 - 8 mm	1718	Estructura granular del hormigón El tamaño de los agregados se limitan a 8 mm debido al rebote
Superplastificante	Sika® ViscoCrete® SC	4	Reduce el requerimiento de agua Aumenta la trabajabilidad
Peso/m ³		2310	
Acelerante	Sigunit®-L AF	24	Acelera el desarrollo de resistencia Aplicación de hormigón sin encofrado

Tabla 6-2: Diseño de la mezcla de hormigón proyectado húmedo

Mezcla diseño 1 m ³ de hormigón proyectado	Relación	kg	kg/L	Litros
Diseño de mezcla				1000
Cemento		400	3.15	127
Agua	0.48	192	1.00	192
Vacíos de aire	4 %	0	0.00	40
Agregados	100 %	1718	2.68	641
Arena 0 - 4 mm	60 %	1031	2.68	385
Grava 4 - 8 mm	40 %	687	2.68	256
Agua				192
Humedad de la arena	4 %	1031	1.00	41
Humedad de la grava	2 %	687	1.00	14
Agua agregada				137
Aditivos				
Sika® ViscoCrete®-SC	1 %	4	1.10	4
Sigunit®-L AF	6 %	24	1.40	17



Fig. 6-1: Componentes del diseño de la mezcla del hormigón proyectado: gravilla, agua, cemento, superplastificante, arena (de izquierda a derecha)

6.4 BALANCE DE MATERIALES DEL HORMIGÓN PROYECTADO HÚMEDO



Fig. 6-2: Componentes de mezcla por peso

Fig. 6-3: Componentes de mezcla por volumen

Proceso de proyectado

- Ø 10 % Rebote de agregados (volumen)
- Ø 4 % Pérdida de cemento (peso)
- Ø 3 % Compactación del hormigón (volumen)
- + 6 % Acelerante (peso cemento)

Hormigón proyectado aplicado

2362 kg/m³



Fig. 6-4: Balance material X peso después de lanzar

Fig. 6-5: Balance material x volumen después de lanzar

6.5 DISEÑOS DE MEZCLAS ESPECIALES PARA HORMIGÓN PROYECTADO HÚMEDO

Tabla 6-3: Diseño recomendado de mezcla

Diseño de mezcla	
Componentes	Tipo
Cemento	CEM I
Agregados	0 - 8 mm
Agua	No contaminantes
Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC
Acelerante	Sigunit®-L AF

Tabla 6-5: Cambios en diseño de mezcla para requerimientos especiales

Más resistencia inicial		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 30 kg Cemento	CEM I	Desarrollo de mayor resistencia inicial
+ 2 % Acelerante	Sigunit®-L AF	Desarrollo de mayor resistencia inicial

Mayor resistencia final		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 20 kg humos de sílice	SikaFume®	Densidad aumentada
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad / menor req. agua
- 15 kg Agua	Agua	Mayor densidad

Mayor tiempo de trabajabilidad		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 0.3 % Retardante	SikaTard®	Retarda la hidratación

Mayor bombeo		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 30 kg Fines	Arena fina /caliza / cenizas vol	Lubricación
+ 0.5 % Agente de bombeo	SikaPump®	Reduce presión de bombeo
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor operabilidad

Mayor durabilidad I		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
- 15 kg Agua	Agua	Densidad aumentada
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad/menor req. agua

Mayor durabilidad II		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 30 kg humo de sílice	SikaFume®	Densidad aumentada
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad / menor req. agua

Tabla 6-4: Parámetros óptimos del hormigón proyectado

Valor
400 kg
1718 kg
192 kg
1 %
6 %

Parámetros recomendados	
Flujo expansion	600 mm
Temperatura	20 °C
Vacíos de aire	4%
Desempeño resistencia	J2
Tiempo trabajabilidad	2 hrs
Agua / Cemento	0.48

Ductilidad mayor I		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 30 kg kg fibras acero macro	Hooked L=35 mm, Ø 0.5 mm	Mayor absorción energía
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad

Ductilidad mayor II		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 10 kg Fibras sintéticas macro	Modificado PP L=50 mm, Ø 0.5 mm	Mayor absorción energía
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad

Mejor resistencia al fuego		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
+ 2 kg Macro fibras sintéticas	PP L=6 mm, Ø 0.04 mm	Reducción presión de vapor
+ 0.2 % Superplastificante	Sika®ViscoCrete® SC	Mejor trabajabilidad

Costo Desempeño Optimizado I		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
- 70 kg Cemento	CEM I	Reducción de costos
+ 70 kg Aditivos	Piedra caliza / cenizas volantes	Sustitución

Costo Desempeño Optimizado II		
Cambio diseño de mezcla	Producto	Efecto
- 400 kg Cemento	CEM I	Reducción de costos
+ 400 kg Cemento incorporado	CEM II	Sustitución

6.6 CURVA DE GRADACIÓN DEL HORMIGÓN PROYECTADO

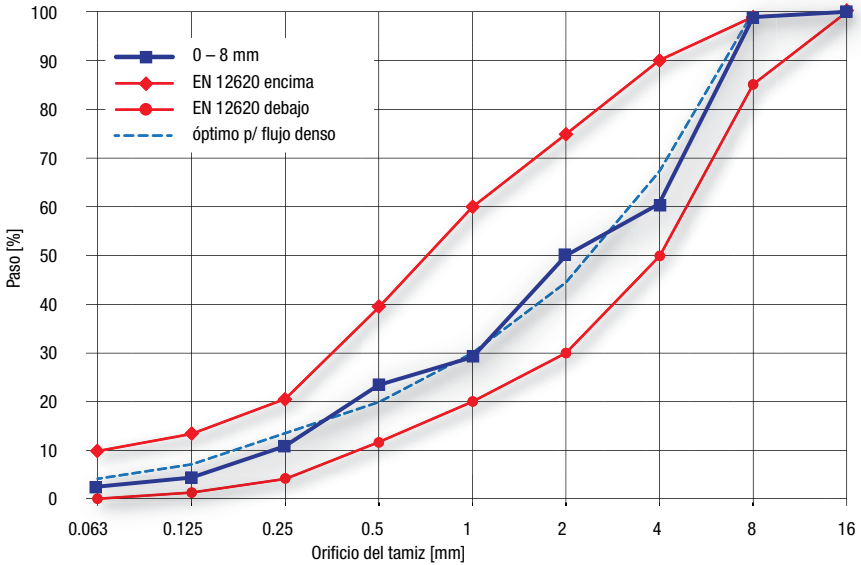


Fig. 6-6: Curva de gradación óptima y sus límites

Tabla 6-6: Configuración óptima de la curva de gradación

Relación de los componentes	Componentes de la curva de gradación	Tamaño tamiz y paso								
		0.063 mm	0.125 mm	0.25 mm	0.5 mm	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm	16 mm
60 %	0 - 4 mm	3 %	7 %	18 %	38 %	48 %	82 %	97 %	100 %	100 %
40 %	4 - 8 mm	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	2 %	6 %	97 %	100 %
100 %	0 - 8 mm	1.8 %	4.2 %	10.8 %	22.8 %	29.2 %	50.0 %	60.6 %	98.8 %	100 %

6.7 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

El contratista debe idear un plan de aseguramiento de calidad como parte de las pruebas de calificación (prueba inicial) y también para el aseguramiento de calidad habitual. Debe incluir los parámetros de calidad y confiabilidad relevantes de una manera lógica y práctica que permita trabajar de forma económica y así ejecutar el plan. Aseguramiento de calidad debe definir todo el proceso.

Tabla 6-7: Verificación de calidad del hormigón proyectado

Proceso	Fase	Parámetro de prueba	Frecuencia
Componentes	Agregados	Humedad Curva nivelación Tamaño Particula	Cada entrega Periódicamente
	Cemento / Aditivos	Entrega de documentos	Cada entrega
	Aditivos	Entrega de documentos	Cada entrega
Producción de hormigón	Planta de mezcla	Peso / mezcladora	Según plan de mantenimiento
	Producción de hormigón	Consistencia producción Diseño mezcla	Cada lote
	Prueba hormigón fresco	Contenido de agua Densidad hormigón fresco Temperaturas (hormigón/ aire) Consistencia Contenido de aire	Periódicamente
Transporte	Transporte de equipo	Mantenimiento	Según plan de mantenimiento
Aplicación	Unidad de hormigón proyectado	Mantenimiento Dosis acelerante	Según plan de mantenimiento A diario
	Hormigón proyectado	Consistencia Desarrollo resistencia Resistencia final Durabilidad	Según plan de prueba

7 HORMIGÓN PROYECTADO SECO

El proceso de hormigón proyectado seco consiste en entregar (transportar) una mezcla ya lista compuesta de agregado, cemento y cualquier aditivo para el hormigón proyectado, pero sin mezclar agua. La fórmula de mezcla ya lista viene completamente seca (secada al horno) o humedecida por la humedad inherente del agregado. Para realizar la operación de proyectado de dicho hormigón, éste se mezcla con agua y acelerantes de hormigón proyectado y luego se aplica. En lugar de acelerantes de hormigón proyectado se pueden usar cementos especiales de endurecimiento rápido que fraguan en poco tiempo después de humedecidos con agua. Se debe emplear el proceso de flujo diluido para entregar el hormigón proyectado seco. Este proceso ha tenido éxito durante largo tiempo, pero continuamente se desarrolla y mejora.

7.1 USOS

El hormigón proyectado seco se usa siempre que se requieren cantidades y volúmenes más pequeños y es fundamental lograr alto grado de resistencia muy temprano, por ej., en el sellado preliminar con gunitas contra un alto nivel de penetración de agua. ¡La elección final la determina el contratista!

Aplicaciones del hormigón proyectado seco y la mezcla lista de gunitas:

- reparaciones de hormigón
- sellado preliminar para prevenir filtración de agua
- trabajos medianos de proyectado
- trabajos de impermeabilización
- concepto de logística que no depende del tiempo (almacenamiento local)

7.2 VENTAJAS

Las ventajas del hormigón proyectado seco radican en su flexibilidad. El método tradicional de aplicación del hormigón proyectado, conocido mundialmente, ofrece

- desarrollo de gran resistencia temprana para sellado preliminar o estabilización
- un tiempo casi ilimitado de bodegaje (disponibilidad) de material almacenado en silos
- no hay desperdicio de hormigón

Los aspectos económicos del hormigón proyectado se ven afectados por las altas cantidades de rebote y generación de polvo y mayores costos de desgaste.

7.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DEL HORMIGÓN PROYECTADO SECO

El diseño de mezcla del hormigón proyectado seco también depende de los requerimientos. No obstante, aparte del requerimiento de resistencia temprana, el uso económico del hormigón proyectado seco requiere adaptación para optimizar la generación de polvo y la cantidad de rebote. Es como resultado de estos parámetros que se seleccionan y confirman, mediante pruebas o adaptación con evaluación previa de los parámetros objetivos, el tipo y contenido de cemento, tipo y gradación de los agregados, contenido de agua (humedad inherente) y tipo y cantidad de aditivos que se agregan al hormigón proyectado. Abajo se detalla la fórmula típica del hormigón proyectado seco.

En cuanto a los tamaños de las partículas de piedra, el agregado que hay disponible localmente es el principal factor que determina la elección de la curva de gradación. La curva que mejor cumple los requerimientos enunciados debe establecerse mediante prueba y experimentación con el material granular disponible. En el hormigón proyectado seco con frecuencia se emplean mezclas preparadas secadas en hornos provenientes de productores de mortero proyectado, particularmente para aplicaciones de mortero proyectado seco, esto es, gunitas. Estas gunitas se suministran en bultos o mediante silos y se almacenan en silos antes del uso, para no depender de los agregados obtenidos localmente.

7.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

En el proceso seco es muy importante predeterminar la humedad inherente, para determinar la generación de polvo y la entrega. Si el material es demasiado seco, se generan grandes cantidades de polvo. Y si por el contrario el material es demasiado húmedo, se bloquea (tapona) el sistema de entrega. El contenido de humedad inherente de los agregados debe estar entre 2 % y 5 % y es controlado por la humedad del material granular u obtenido mediante instalaciones especiales de humectación. La mezcla seca producida en la planta de mezcla tiene alguna humedad inherente, porque el agregado sólo se puede conservar completamente seco con gran esfuerzo. El mortero y el hormigón proyectado listos para usar que se producen en plantas de material seco es tan seco como el polvo y debe pre humedecerse para reducir el polvo que se genera.

7.5 BALANCE DE MATERIALES DEL HORMIGÓN PROYECTADO SECO

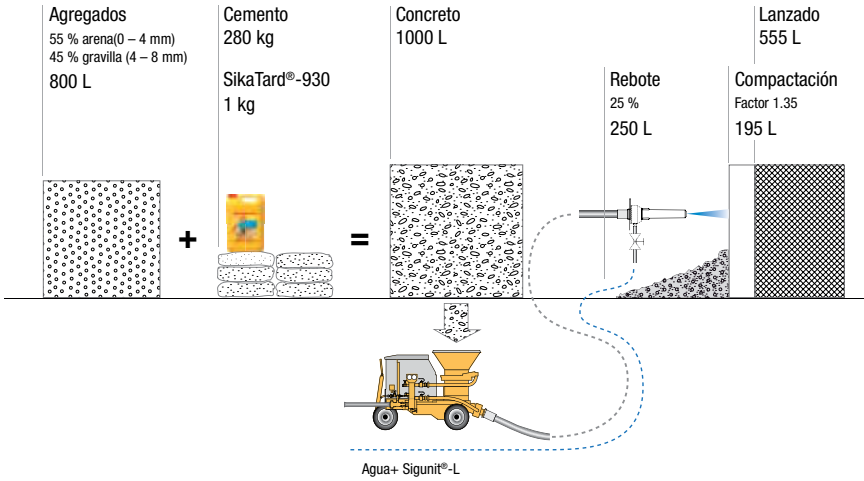


Fig. 7-1: Balance de materiales del hormigón proyectado seco

$$\text{Contenido de cemento en el hormigón proyectado aplicado} = \frac{\text{cantidad cemento} - \text{pérdida de cemento}^{(1)}}{\text{Volumen de hormigón proyectado aplicado}}$$

$$\frac{0.9 \times 280 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ L}}{555 \text{ L}} = 454 \text{ kg/m}^3$$

⁽¹⁾ 25 % Rebote (volumen) ≈ 10 % pérdida cemento (peso)

Fig. 7-2: Contenido de cemento en el hormigón proyectado seco aplicado

8 APLICACIONES DEL HORMIGÓN PROYECTADO

8.1 SEGURIDAD

La seguridad es un concepto general en la industria de la construcción, especialmente en la construcción con hormigón proyectado, puesto que combina maquinaria de alto poder (hidráulica/neumática/electrónica) con métodos de aplicación en que el hormigón se proyecta por el aire! Los operarios y las personas que están cerca deben protegerse. Los peligros son:

- Transporte del hormigón proyectado en vehículos grandes, usualmente en espacios cerrados con luz deficiente: las precauciones personales incluyen mantenerse a buena distancia; usar ropa de protección de alta visibilidad; iluminar adecuadamente el vehículo (y mantenerlo limpio); y usar señal de alarma de marcha en reversa en los vehículos.
- Transferencia del hormigón al sistema de conducción: Debe haber un guardia que impida el acceso a la unidad de conducción; equipo de protección personal (importante: protección para los ojos en caso de salpicadura).
- Conducción del hormigón proyectado, aire y acelerantes de hormigón proyectado a los puntos de aplicación: mantenimiento periódico de equipos según el plan (particularmente, revisión de tubos y mangueras); capacitación técnica adecuada de los mecánicos, equipo de protección personal, iluminación adecuada del sitio.
- Aplicación del hormigón proyectado: Equipo de protección personal (gafas resistentes a golpes, casco, guantes, aparato para respirar, protectores de oídos, botas de seguridad, ropa para todo el cuerpo, ingreso prohibido en áreas desprotegidas de aplicación reciente de proyectado; iluminación apropiada.
- El personal ajeno no debe estar cerca de las áreas de operación de proyectado. Si lo está, debe usar el mismo equipo de protección personal descrito.

El mayor peligro es sin duda el riesgo de que caiga hormigón proyectado fresco o sustrato inestable sobre los obreros, uso inadecuado de equipos e instalaciones eléctricas, hidráulicas y neumáticas, y el descuido, especialmente olvidarse de usar el equipo de protección personal como las gafas de seguridad.

8.2 SUSTRATO DE HORMIGÓN PROYECTADO

La adhesión entre el hormigón proyectado y el sustrato sólo puede ser tan buena como sea la calidad de las dos caras en contacto. Debido a su contenido de ligante y alta velocidad de impacto, el hormigón proyectado posee las condiciones adecuadas de fuerte anclaje [keying] y gran resistencia adhesiva. Por lo tanto, la otra cara del punto de contacto, el sustrato, es por lo general el factor clave en la adhesión. En caso de preparar o emparejar [blinding] el hormigón, éste debe quedar rugoso, lo que generalmente se logra con un proyectado de acabado rugoso. La superficie debe estar libre de partes sueltas de baja adhesión. La superficie se debe humedecer para evitar que el área de adhesión se seque por el efecto absorbente del hormigón seco emparejado. Lo mismo aplica en principio para superficies de excavaciones frescas. La fuerza de la operación de limpieza depende de la cohesión interna del sustrato y el requerimiento de agua se basa en la humedad inherente de la superficie de adhesión. El sustrato no debe tener polvo.

- limpie la superficie de contacto (polvo / secciones sueltas)
- humedezca el sustrato (según la absorbencia del sustrato)
- aplique el hormigón/mortero proyectado correctamente (en sentido perpendicular al sustrato)

Para optimizar las operaciones, la superficie puede limpiarse con el aire comprimido de la unidad de proyectado y luego enjuagarse y mojarse con agua corriente. Este trabajo debe hacerse justo antes del proyectado, para impedir la formación de una capa de polvo aislante inmediatamente después. Lo mismo aplica si el hormigón proyectado se construye capa por capa. Si hay mucha infiltración de agua, se requiere un sellado previo o evacuar el agua por canales de drenaje.

8.3 PROYECTADO

El hormigón y mortero proyectado pueden aplicarse por capas, en la misma operación, lanzando repetidamente sobre la misma área, o en una operación posterior después de una pausa. Después de una pausa prolongada la superficie debe limpiarse y humedecerse nuevamente. La cantidad que puede aplicarse en una operación depende de diferentes factores:

- la resistencia adhesiva de la mezcla de hormigón proyectado
- la naturaleza del sustrato o de la capa base
- el proceso de proyectado
- el volumen de proyectado
- la dirección del proyectado (hacia arriba horizontalmente)
- las obstrucciones (refuerzo/agua)
- la distancia entre la boquilla y el sustrato

Se requiere un enfoque diferente según la dirección del proyectado.

Al proyectar hacia abajo, pueden aplicarse capas de cualquier espesor. Asegúrese de que el rebote quede empotrado o se descarte, de manera que no quede en la superficie.

Al proyectar horizontalmente, el espesor se puede construir gradualmente en capas delgadas, y para aplicaciones muy espesas se puede aplicar todo el grosor desde la parte baja de la pendiente hacia arriba, por capas. En este caso nuevamente el rebote debe removerse de la parte baja antes de aplicar la siguiente capa.

Al proyectar directamente por encima, el peso del material y la adhesión del hormigón proyectado se contraponen mutuamente, por lo cual deben construirse capas más delgadas. Como regla general, un flujo de proyectado menor y la aplicación de capas más delgadas generan menor rebote y producen un mejor resultado final. El rebote no es problema en este caso.

El proyectado debe aplicarse en ángulo recto respecto al sustrato o hormigón emparejado [blindado]. Esto maximiza la adhesión y la compactación y minimiza el rebote. El hormigón o mortero proyectado se aplica manual o mecánicamente con movimientos circulares, uniformemente en toda la superficie. Lanzar sobre refuerzos es particularmente difícil y requiere experiencia porque son muy frecuentes las cavidades debidas a las sombras del proyectado. Este problema se evita con el uso de hormigón proyectado reforzado con fibra de acero.

La distancia óptima de proyectado es de 1,2 a 1,5 metros pero con frecuencia se da en de un rango de 1 a 2 metros. A grandes distancias el rebote y la generación de polvo aumentan y disminuye la eficacia de la aplicación.

8.3.1 Parámetros recomendados para el proyectado húmedo

	Parámetros	Recomendaciones y límites	Mejorando ...							
			Desarrollo resistencia	Bombeabilidad	Unión con sustrato	Cohesión interna	Tiempo de trabajabilidad	Mezcla de acelerador y Hormigón proyectado	Ambiente, salud y seguridad	Llenado de cilindro
Diseño de mezcla	Binder	400 - 500 kg/m ³	x	x	x					
	Agregados	60 % of 0 - 4 mm / 40 % of 4 - 8 mm / 4 - 9 % of ≤ 0.125 mm		x	x					
	Agua	w/b 0.45 - 0.50	x	x		x				
	Superplastificante	0.8 - 1.2 %	x	x			x	x		
	Acelerante	5 - 8 %, libre de alcalí	x		x				x	
Hormigón fresco	Flujo expansión	550 - 650 mm over minimum 2 hrs		x				x		x
	Asentamiento	180 - 220 mm over minimum 2 hrs		x				x		x
	Cont vacíos aire	3 - 8 %		x				x		
	Temperatura	15 - 25 °C	x				x			
Aplicación	Volumen	≤ 75 % of máximo output performance								x
	Distancia	1.5 - 2 m								
	Angulo	90°								
	Aire	4 - 5 bar						x		
Condición	Sustrato	Limpio y seco			x					
	Temperatura	> 10 °C	x							
	Operador	educado								
	Equipo	bien mantenido								

				Reducción de ...											
Eficacia del acelerante	Compactación hormigón proyectado	Calidad del hormigón proyectado	Eficacia aplicación hormigón proyectado	Hormigón pegajoso	Rebote	Exudación del hormigón	Bloqueo del equipo	Desgaste en el equipo	Laminación del hormigón proyectado	Hormigón proyectado no homogéneo	Necesidad de aditivo (acelerante / retardante)	Falla por adhesión	Tiempo extra en proyectado	Costo extra debido a mala aplicación	Generación de polvo
				x											
				x	x		x								
				x		x									
							x	x							
												x			
									x	x					
									x	x					
										x					
x								x	x						x
	x				x							x			
	x				x							x			
	x				x							x			x
												x			
												x			
													x		
		x	x		x						x		x	x	x
		x	x				x	x					x	x	

8.3.2 Reglas para la aplicación del proyectado



Fig. 8-1: Limpieza polvo del sustrato con agua



Fig. 8-2: Rellenar de vacíos

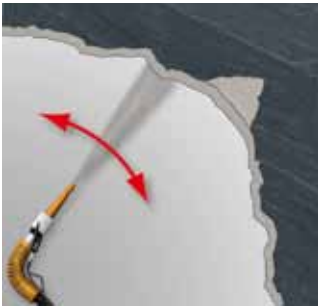


Fig. 8-3: 1a capa hormigón proyectado - 1a estabilización de excavación y puente adhesivo para 2ª capa de hormigón proyectado

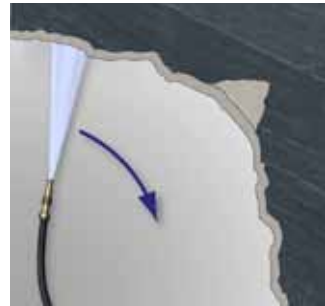


Fig. 8-4: Remoción de polvo con agua luego de pausas más largas



Fig. 8-5: 2a capa hormigón proyectado - estabilización de excavación, generalmente con refuerzo de acero

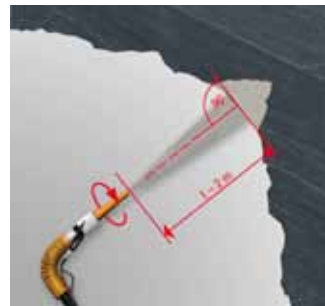


Fig. 8-6: Correcto manejo de la boquilla - demasiado aire produce rebote y mucho volumen causa laminación

8.4 CONFIGURACIÓN DE BOQUILLAS

La configuración de la boquilla significa la manera en que los elementos que requiere la aplicación se alimentan al chorro principal de hormigón proyectado. Los siguientes elementos se incorporan a los diferentes procesos justo antes de la aplicación:

Tabla 8-2: Componentes que se agregan en la boquilla

Hormigón proyectado húmedo Proceso de flujo denso	Hormigón proyectado húmedo Proceso de flujo diluido	Hormigón proyectado seco Proceso de flujo diluido
<ul style="list-style-type: none">• Aire como conductor del hormigón y del acelerante• Acelerante de hormigón proyectado	<ul style="list-style-type: none">• Aire como conductor del acelerante• Acelerante de hormigón proyectado	<ul style="list-style-type: none">• Agua (conductor)• Acelerante de hormigón proyectado (agua como conductor)

La configuración de la boquilla depende del proceso y los acelerantes elegidos. Se adicionan preferiblemente acelerantes alcalinos 2 – 5 m detrás de la boquilla. Debido a que requieren cierto tiempo para reaccionar, se obtienen mejores resultados en el rango de resistencia temprana. Debido a que el chorro se descontinúa por la bomba dúplex, los acelerantes alcalinos liberan un proyectado fino de agua y aerosoles cáusticos en el suministro de aire del túnel. Una alimentación correcta de 2 – 5 m detrás de la boquilla compensa la pulsación y adhiere el acelerante. Esto reduce notablemente el polvo. El problema de los vapores y aerosoles cáusticos se obvia usando acelerantes libres de álcalis. También son sumamente reactivos y deben agregarse únicamente justo frente a la boquilla. La corta duración del chorro de hormigón proyectado reduce la cantidad de polvo.

La boquilla concentra el chorro y es responsable de la configuración del proyectado. Se han diseñado boquillas de alta calidad para conducir todo el conglomerado al sustrato sin pérdidas. Asimismo, la distribución de todas las partículas debe ser homogénea por el corte transversal del chorro.

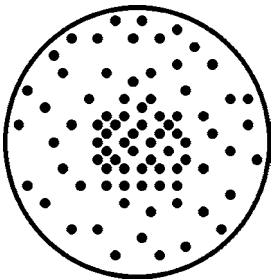


Fig. 8-7: Distribución deficiente de las partículas en el corte transversal del chorro

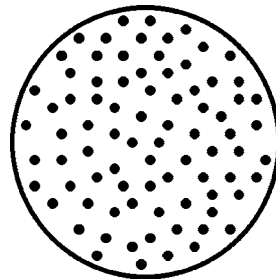


Fig. 8-8: Buena distribución de las partículas en el corte transversal del chorro

La boquilla de proyectado es uno de los elementos más importantes del sistema de proyectado y es la parte que más se desgasta en el proceso. La mezcla meticolosa de aire, hormigón y acelerante fijador ocurre dentro de la boquilla.

Se obtienen varias ventajas de los nuevos conceptos de boquilla. La reducción del orificio de salida ha permitido optimizar el consumo de aire y a la vez cumplir las normas de protección de la salud que deben observarse cada vez más estrictamente. Otra ventaja es que en caso de obstrucción, el inyector expelle la boquilla, evitando el taponamiento de los orificios por los que se alimentan aire y acelerante al flujo de hormigón. La boquilla desprendida se puede limpiar y fácilmente montar de nuevo. Para mantener bajos los costos de la principal pieza que se desgasta, las boquillas se fabrican con un mínimo de material mediante un proceso sencillo.



Fig. 8-9: Boquilla de flujo diluido

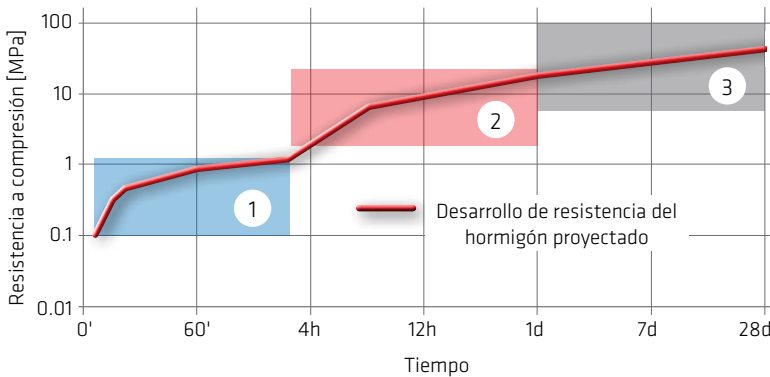


Fig. 8-10: Boquilla de flujo denso

8.5 MÉTODOS DE MEDICIÓN

La resistencia a la compresión inicial y temprana del hormigón proyectado, esto es hasta las 24 h, se mide por métodos indirectos mediante penetrómetro y perno Hilti. Ambos métodos correlacionan el impacto de la resistencia a la compresión en la penetración de una aguja. Debe tomarse en cuenta que, aparte de cualquier recomendación aportada por lo estipulado por este método o las normas locales (folleto Hilti, EN 14488-2, etc.), cualquier función de correlación general que describa estos impactos es tan sólo una aproximación. Por lo tanto los resultados de estos métodos dependen del diseño de la mezcla, esto es, de los agregados usados (0 – 8 mm) y no necesariamente dan valores absolutos de resistencia a la compresión.

Fig. 8-11: Métodos de medición del desarrollo de resistencia



La medición de la resistencia a la compresión total del hormigón proyectado requiere tres métodos:

Tabla 8-3: Métodos de medición de desarrollo de resistencia

Desarrollo de	Método	Instrumento	Resistencia	Tiempo	
1	Resistencia inicial	Penetración aguja	Penetrómetro	hasta 1.5 MPa	0 – 3 h
2	Resistencia temprana	perforación perno	Hilti DX 450-SCT	3 – 20 MPa	3 – 24 h
3	Resistencia final	Toma de núcleo	Máquina de prueba compresión	5 – 100 MPa	1 – 28 d

8.5.1 MÉTODO DE PENETRACIÓN DE LA AGUJA

Estos resultados se calculan por la fuerza requerida para penetrar 15 mm de la superficie de la muestra con una aguja de 3 mm. La punta de la aguja tiene un ángulo de 60°. Con este método se puede determinar manualmente la resistencia hasta aprox. 1,5 MPa.



Fig. 8-12: Penetración del hormigón proyectado fresco con un penetrómetro digital (Mecmesin AFG 1000)

8.5.2 MÉTODO DE PERFORACIÓN CON PERNO [STUD DRIVING (HILTI)]

Las resistencias a la compresión entre 3 y 20 MPa se determinan mediante pernos roscados que se introducen en la superficie de hormigón proyectado. La profundidad de la penetración da el resultado de la resistencia a la compresión según una curva de calibración.



Fig. 8-13 / 14: Penetración de hormigón proyectado joven con pernos empleando un Hilti DX 450-SCT (izq) y medición de parte que sobresale del perno para determinar la penetración

8.5.3 MÉTODO DE PERFORACIÓN DE NÚCLEO (DRILL CORE)

La resistencia a la compresión final se determina mediante núcleos perforados según la norma EN 12504-1 "Prueba del hormigón en estructuras".



Fig. 8-15 / 16: Perforación de núcleo de una muestra de hormigón proyectado (izq) y medición de la resistencia a la compresión de un núcleo (der).

8.5.4 CLASES DE RESISTENCIA (EN 14487-1)

La mayor parte del hormigón proyectado se emplea actualmente en día en la construcción de túneles. El desarrollo de resistencia temprana juega un papel clave especialmente en la minería profunda. El hormigón proyectado debe aplicarse rápidamente en capas gruesas, incluso directamente por encima. Como resultado las resistencias del hormigón proyectado fresco se dividen en tres clases: J1, J2 y J3 (EN 14487).

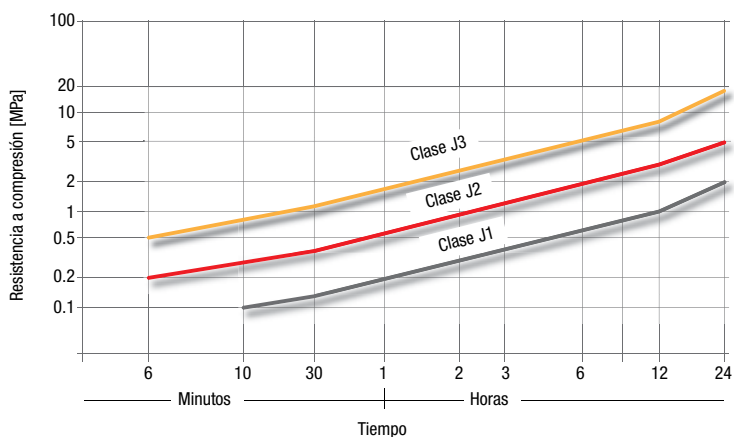


Figura 8-17: Clases de resistencia temprana del hormigón proyectado según EN 14487-1

El hormigón proyectado Clase J1 es adecuado para aplicar en capas delgadas sobre un sustrato seco. No deben esperarse requerimientos estructurales durante las primeras horas después de la aplicación de este tipo de hormigón proyectado.

El hormigón proyectado Clase J2 se usa en aplicaciones donde deben lograrse capas gruesas en corto tiempo. Este tipo de hormigón proyectado puede aplicarse directamente por encima y es apto aún en circunstancias difíciles, como por ejemplo en caso de afluencia leve de agua y pasos inmediatos posteriores tales como perforación y voladuras.

El hormigón proyectado Clase J3 se usa en casos de roca muy frágil o fuerte afluencia de agua. Debido a su fraguado rápido hay más polvo y rebote durante la aplicación. Por lo tanto, la clase J3 de hormigón proyectado sólo se usa en casos especiales.

8.6 REBOTE

Reducir el rebote durante el proceso de proyectado es uno de los retos más complejos de todo el proceso. Las influencias son tan diversas que el control sistemático es sumamente difícil. El factor más importante es sin duda el operador de la manguera. Su habilidad técnica y experiencia afectan enormemente la cantidad de rebote. ¡Esto es de vital importancia económica y logística porque cada tonelada de rebote significa que se duplica el trabajo!

Factores que afectan la cantidad de rebote:

- la habilidad técnica y experiencia del operador de la manguera
- la dirección del proyectado (hacia arriba, abajo, horizontalmente)
- los parámetros de proyectado (presión de aire, boquilla, volumen del proyectado)
- el proceso de proyectado (hormigón proyectado seco / húmedo)
- diseño de mezcla del hormigón proyectado (agregados, curva gradación, acelerantes, fibras, ligante)
- desempeño del hormigón proyectado (resistencia muy temprana, fuerza adhesiva, espesor capas)
- condición del sustrato (uniformidad, adhesión)

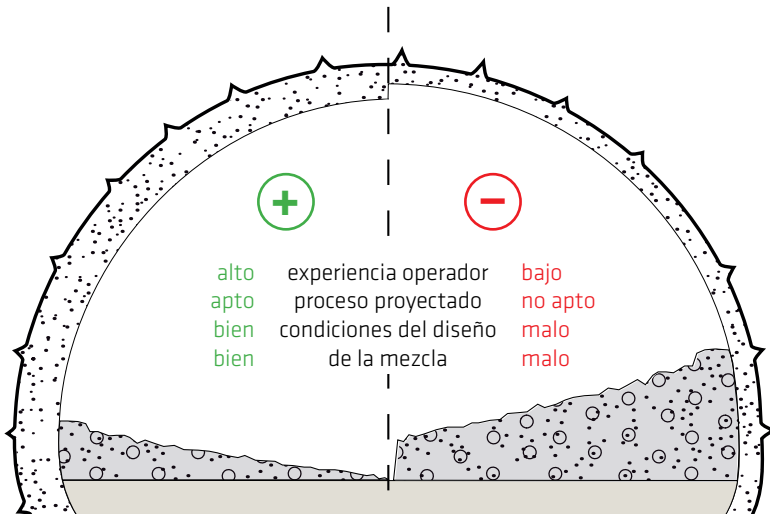


Figura 8-18: Factores que influyen en el rebote

El rebote cambia durante el proceso de proyectado. En los primeros minutos son principalmente los grandes agregados los que rebotan puesto que una capa de superficie adherente fina debe construirse sobre el sustrato y así todos los componentes de la mezcla rebotan durante la operación. La cantidad de rebote puede ser bien controlada mediante la resistencia adhesiva del hormigón proyectado.

Cantidad de rebote

Sin mediciones separadas del rebote bajo condiciones existentes en el sitio, la cantidad solo puede estimarse de forma aproximada:

- rebote con hormigón proyectado seco 20 – 30 % para aplicación vertical sobre cabeza
- rebote con hormigón proyectado húmedo 5 – 15 % para aplicación vertical sobre cabeza

Reutilización / Disposición de desechos

En principio, el rebote de hormigón proyectado es reciclable junto con todos los componentes de la mezcla original. Sin embargo, puede estar contaminada por las condiciones existentes en el sitio. Al igual que con el hormigón estructural, una pequeña proporción de máximo 10 a 20 % de hormigón proyectado que ha sido correctamente tratado puede reutilizarse sin problema.

8.7 DESARROLLO DE POLVO

Hay producción de polvo con la aplicación de cualquier tipo de hormigón proyectado pero las cantidades y tipos de polvo varían considerablemente. Existe un gran problema con el hormigón proyectado seco puesto que sus componentes tienen tendencia natural a generar polvo. La cantidad de polvo generado puede reducirse empleando medios adecuados. Las medidas que reducen la cantidad de polvo generado por el proceso de hormigón proyectado seco son:

- uso de agregados levemente húmedos (en lugar de secados al aire)
- sellado del sistema de alimentación del conductor
- parámetros debidamente ajustados y coordinados (sincronizados) en la boquilla (aire (minimizar), agua, acelerador (minimizar))
- transporte de material a baja pulsación
- uso de acelerantes de hormigón proyectado libres de álcalis
- uso de manipuladores de proyectado para rendimientos > 6 m³/h
- aditivos de hormigón proyectado para fijar el polvo depositado

A pesar de todas estas medidas, se genera dos a cuatro veces más polvo en el proceso de hormigón proyectado seco que en el húmedo. Para mejorar más la seguridad solo se deben usar acelerantes de hormigón libres de álcalis.

8.8 SOMBRAS DE PROYECTADO

La presencia de vacíos en el material aplicado, como por ejemplo detrás de los refuerzos, es un problema importante en las reparaciones con hormigón y mortero proyectado y además representa un reto para la construcción con hormigón convencional. Un experimentado operador de boquilla puede minimizar las sombras de proyectado únicamente mediante una correcta elección de las secuencias de proyectado. La importancia que tiene el operador de la boquilla como factor principal en la aplicación de hormigón proyectado de alta calidad es fundamental.





8.9 MECANIZACIÓN / AUTOMATIZACIÓN

Toda operación o paso que se repite constantemente exige una mayor automatización. Hace más de 100 años, un gran número de obreros constructores de túneles forzaban manualmente el mortero Sika®-1 de fraguado rápido en las juntas de las paredes de mampostería de escombros, mientras que en nuestros días, unos pocos especialistas con maquinaria de proyectado de alta gama y sistemas de proyectado de hormigón pueden colocar rápidamente y a escala industrial grandes cantidades de hormigón y mortero proyectado de alta calidad, mejorados con aditivos. La mecanización está muy avanzada en la tecnología del hormigón proyectado y cubre toda la operación, desde la producción hasta la aplicación. El futuro traerá más automatización de la operación, facilitando así la labor del operario del chorro. El objetivo debe ser concentrar la experiencia del operador en el trabajo del hormigón proyectado y liberarlo de las diferentes secuencias mecánicas susceptibles de automatización. Para ser aptos para la construcción de túneles, todo nuevo desarrollo debe ser fuerte y sumamente sólido en su diseño y sencillo en su forma, para poder sobrevivir.

9 PROCESOS DE PROYECTADO

El proceso de proyectado define la conducción del hormigón o mortero proyectado desde su transferencia del vehículo de suministro hasta la boquilla y el proyectado del material. Hemos visto que existe una diferencia entre el hormigón proyectado seco y húmedo. Esta diferencia también aplica a los procesos puesto que deben conducirse y lanzarse de forma diferente debido a las propiedades del material.

Tabla 9-1: Resumen de los procesos de hormigón proyectado

Medio	Material Condición	Sistema de entrega	Medio de transporte	Método de entrega	Inyección adicional en la boquilla
Gunita (premezclada)	secado de horno	Rotor (neumático)	Aire 	Flujo diluido (Entrega x aire)	Agua
Hormigón seco	humedad de la tierra	Rotor (neumático)	Aire 	Flujo diluido (Entrega x aire)	Agua + Acelerante
Hormigón	húmedo	Rotor (neumático)	Aire 	Flujo diluido (Entrega x aire)	Aire + Acelerante
Hormigón	húmedo	Bomba (hidráulica)	Hormigón 	Flujo denso (Entrega x empuje)	Aire + Acelerante

Los dos procesos tienen ventajas y desventajas específicas, de las que se derivan sus usos respectivos. La siguiente tabla presenta una comparación general de las características de los dos sistemas.

Tabla 9-2: Principales criterios en la selección de la técnica de proyectado

	seco	húmedo
formación de polvo	moderado	bajo
rebote	moderado	bajo
volumen proyectado	mediano	alto
costos de equipos	bajo	alto
	cantidades medias ↓ secciones transversales pequeñas	cantidades altas ↓ secciones transversales grandes

Tabla 9-3: Proceso de proyectado y su aplicación

Equipo / Medio	Fluido diluido			Fluido denso
	Rotor, mortero premezclado	Rotor, hormigón húmedo tierra	Rotor, Hormigón	Bomba, Hormigón
Requerimientos de entrega				
Distancia de entrega > 200 m	x			x ⁽¹⁾
Distancia de entrega 40 - 200 m	x	x		x ⁽¹⁾
Distancia de entrega < 40 m	x	x	x	x
Volumen de entrega > 10 m ³ /h			x	x
Volumen de entrega 3 - 10 m ³ /h	x	x	x	x
Volumen de entrega < 3 m ³ /h	x	x		
Altura de entrega > 100 m	x			x ⁽¹⁾
Altura de entrega 20 - 100 m	x	x		x ⁽¹⁾
Altura de entrega < 20 m	x	x	x	x
Condiciones en el sitio				
Poco espacio / angosto	x	x	x	
Operaciones con muchas interrupciones	x	x	x ⁽²⁾	x ⁽²⁾
Necesidad de muy alto desempeño de resistencia (Filtración int agua / baja temperatura / ...)	x			
Tipo de aplicación				
Construcción de túnel				x
Estabilizaciób de pendiente			x	x
Estabilización de zanjas		x	x	x
Restauración	x	x		
Construcción de arte	x	x		
Sellado	x			

x = apto ⁽¹⁾ = alta cantidad de desperdicio ⁽²⁾ = hormigón retardado

9.1 PROCESO DE PROYECTADO DENSO

Cuando se requiere aplicar cantidades importantes, el hormigón se bombea por tuberías con flujo denso hasta la boquilla, donde se dispersa con aire comprimido. El acelerante se mezcla con el hormigón mediante aire comprimido. La boquilla conforma la mezcla de hormigón y acelerante, produciendo un chorro de proyectado. Gracias a su gran capacidad de emisión, este método se emplea por una parte para estabilizar excavaciones de construcción de túneles y por otro en la estabilización de grandes cavidades para edificaciones.

La principal diferencia con el hormigón convencional bombeado radica en que la pulsación debe ser tan baja como sea posible durante la conducción, para lograr un proyectado constante en la boquilla. Para ello hay varias maneras de mejorar la velocidad de llenado y evitar interrupciones.

El aire comprimido se introduce mediante compresor en mangueras separadas hasta la boquilla. La unidad de medición introduce el acelerante en la boquilla, también por mangueras separadas. La dosis se sincroniza con la cantidad de hormigón para que se agregue siempre la cantidad prefijada de acelerante de hormigón proyectado.

Se requieren máquinas con rotor especialmente diseñadas para suministrar el hormigón proyectado húmedo en el proceso de flujo diluido.

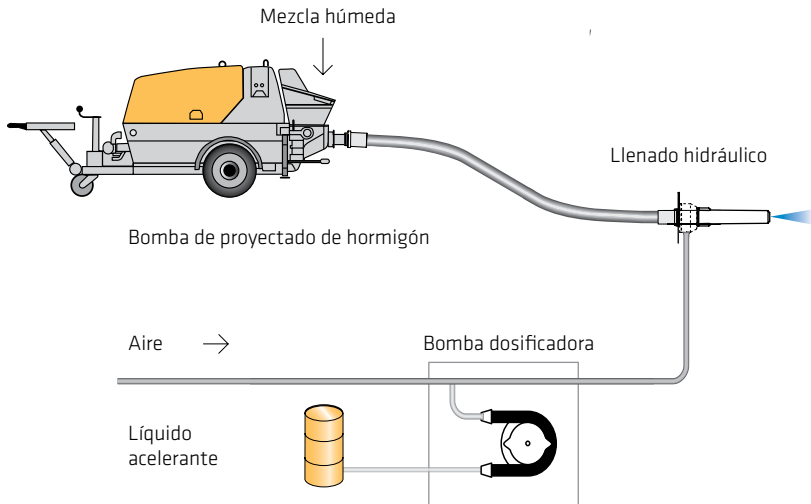


Fig. 9-1: Proceso de flujo denso para hormigón proyectado húmedo

9.1.1 VENTAJAS

Las ventajas del proceso de proyectado húmedo son muchas y variadas. Se trata del método más moderno y eficaz para instalar hormigón proyectado, comparado con el de proyectado seco.

- mayor capacidad de volumen emitido hasta de 25 m³/h en algunos casos
- reducción de la cantidad de rebote entre dos y cuatro veces
- mejora notoria de las condiciones de trabajo debido a la menor generación de polvo
- reduce los costos de desgaste del equipo de proyectado
- bajo consumo de aire al lanzar por el proceso de flujo denso
- mejor calidad del hormigón proyectado instalado (contenido constante de agua)

El hormigón proyectado húmedo en el proceso de flujo denso requiere más trabajo al inicio (arranque) y al final (limpieza) del proyectado que el proceso seco. También se fija previamente el tiempo de trabajo durante la producción y el hormigón proyectado debe aplicarse en ese tiempo o de lo contrario se desperdicia algo de hormigón.

Los usos ideales del proceso de hormigón proyectado húmedo se basan en sus ventajas:

- volumen de proyectado de alto a muy alto
- requerimientos de alta durabilidad

9.1.2 EQUIPOS PARA PROCESO DE FLUJO DENSO

Se usan métodos manuales y mecánicos para el proceso de proyectado húmedo pero tradicionalmente el hormigón proyectado húmedo se aplica con una máquina. Cuando hay altos volúmenes de proyectado y secciones transversales grandes es necesario mecanizar el trabajo. Los sistemas de proyectado de hormigón con bombas dúplex se usan principalmente para trabajar con mezclas húmedas. En contraste con las bombas de hormigón convencionales, estos sistemas deben cumplir el requerimiento adicional de entregar un flujo de hormigón tan constante y por lo tanto tan continuo como sea posible, para garantizar una aplicación homogénea del proyectado.

Descripción funcional de las bombas Putzmeister de doble pistón

Las bombas de hormigón operan hidráulicamente con motores eléctricos o diesel mediante bombas de aceite. Los pistones de suministro están unidos hidráulicamente mediante cilindros propulsores que operan a través de un mecanismo “push-pull” [acción de empujar y halar] El pistón de reversa genera un vacío que es equilibrado por el flujo del material al cilindro. A la vez, el pistón de marcha hacia adelante impulsa el material del cilindro (hormigón proyectado) al tubo de suministro. Al final del levantamiento, la bomba reversa su dirección. El interruptor del tubo pivotea frente al otro cilindro lleno, y los pistones reversan la dirección de su movimiento. Una bomba núcleo consiste en un cilindro impulsador hidráulico, un cilindro de suministro con pistón alimentador, un tanque de agua entre los dos, una tolva de hormigón con agitador, un interruptor de tubo, palanca y un cilindro de reversa para el interruptor del tubo.



Fig. 9-2: Bomba Putzmeister de doble pistón



Fig. 9-3: Sika®-PM 702 D

9.2 PROCESO DE FLUJO DILUÍDO

Los rotores conducen hormigón neumáticamente mediante el aire (flujo diluido), de tal forma que en la boquilla el hormigón no tenga que ser dispersado. La ventaja de este método es que se puede aplicar tanto hormigón proyectado húmedo como seco. Puesto que las máquinas de proyectado por flujo diluido son notablemente más pequeñas que las de flujo denso esta técnica es ideal para aplicaciones en restauraciones en la limitación de espacio con frecuencia impide el trabajo.

El acelerante de hormigón proyectado es alimentado por la unidad de medición por mangueras separadas a la boquilla. La dosis se sincroniza con la cantidad de hormigón de tal forma que la cantidad fijada de acelerante de hormigón proyectado sea siempre agregada. En el proceso seco de proyectado, los acelerantes pueden remplazarse por cementos rápidos especiales que fraguan en poco tiempo después de humedecidos con agua.

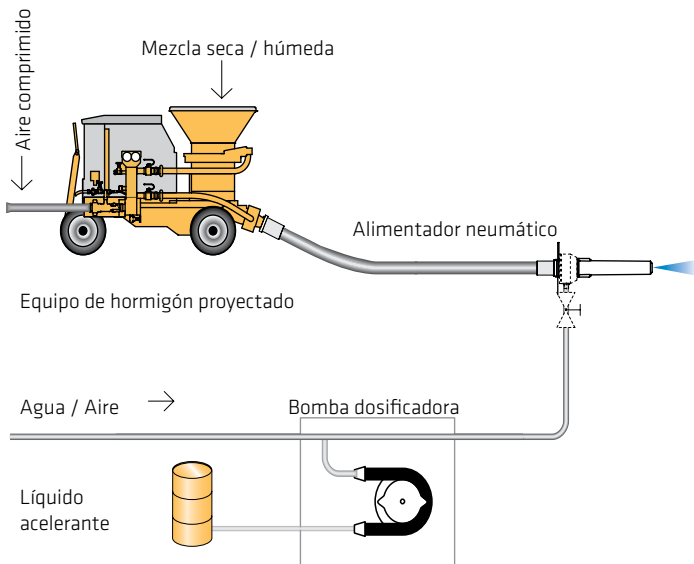


Fig. 9-4: Proceso de flujo diluido del hormigón proyectado seco y húmedo

9.2.1 VENTAJAS

Las ventajas del hormigón proyectado seco radican en su flexibilidad. Se trata del método tradicional de aplicación del hormigón proyectado más conocido mundialmente.

- desarrollo de resistencia muy temprana máxima para sellamiento y estabilización preliminar
- tiempo de almacenamiento casi ilimitado (disponibilidad) de material en silo
- no hay desperdicios de hormigón

Con el hormigón proyectado se afectan los aspectos económicos por las cantidades de rebote, la generación de polvo y los costos de desgaste, que son más elevados.

Las aplicaciones ideales para el hormigón proyectado y las gunitas premezcladas se deben a las ventajas que ofrece el proceso:

- reparaciones de hormigón
- sellado preliminar cuando hay alta penetración de agua
- trabajos de proyectado de tamaño o nivel intermedio
- el concepto logístico no depende del tiempo (almacenaje en el sitio)

9.2.2 EQUIPOS PARA PROCESO DE FLUJO DILUÍDO

En el proceso seco se usa tanto el proyectado manual como el mecánico. Puesto que el hormigón proyectado seco se usa con frecuencia, pero para volúmenes menores de proyectado, su aplicación manual por parte de un operador es mucho más importante que para el hormigón proyectado húmedo. Como ya se describió, las mezclas secas generalmente se aplican con equipos de rotores, que se distinguen, si hacemos una comparación directa, en lo siguiente:

- el volumen proyectado (m³/h)
- usos (seco/húmedo/ambos)
- poder impulsador (neumático/eléctrico)
- tamaño de la unidad de proyectado (dimensiones/peso/conveniencia)
- control (manual/en parte automatizado)
- operación (en la unidad/control remoto)
- instalaciones adicionales (unidades de medición/equipo de limpieza)

Los rotores tienen un diseño robusto y una larga tradición, pero aún presentan posibilidades de desarrollo enfocadas en las siguientes áreas:

- incremento de la resistencia de las partes que se desgastan
- mejor protección contra el polvo
- llenado más eficaz de la cámara
- incremento del volumen de proyectado en algunos mercados

Descripción funcional de los rotores Aliva*

El material a ser transportado en la tolva de llenado (7) se desliza a la cámara del rotor (6). Al girar el rotor (2) y con la conexión superior de aire (1) el material es conducido a la cámara de soplado. (5). Con el soporte del aire inferior (3) el material alcanza la línea de conducción (4). De ahí pasa como flujo diluido o delgado a la boquilla de proyectado, donde se le mezcla el aditivo requerido.

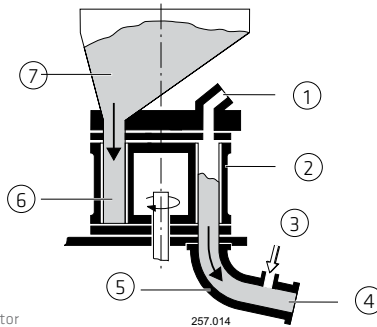


Fig. 9-5: Principio operativo del equipo tipo rotor



Fig. 9-6: Aliva*-237 Top

10 EQUIPOS PARA EL PROYECTADO DE HORMIGÓN

10.1 SISTEMAS SIKA-PUTZMEISTER DE PROYECTADO DE HORMIGÓN

El rango de productos para hormigón proyectado incluye robots de proyectado móviles, así como unidades transportadas por remolque, con un alcance de proyectado hasta de 17 m y transporte de hormigón hasta de 30 m³/h.

10.1.1 SIKA®-PM 307

Unidad de proyectado móvil sobre rieles diseñada para la aplicación automática de hormigón proyectado en trabajos subterráneos (procesos húmedo y seco). Ideal para tramos pequeños de túneles y protección de taludes.

10.1.2 SIKA®-PM 4207

Este robusto y compacto equipo de proyectado de hormigón fue construido especialmente para condiciones de trabajo rudo en minería. El brazo vertical de proyectado con alcance de 9 metros está diseñado para trabajar en tramos de tamaño medio y pequeño. La bomba Putzmeister P715 de doble pistón tiene una capacidad máxima de bombeo de 20 m³/h. La posibilidad de agregar un compresor “a bordo” que se atornilla a la máquina la hace más móvil e independiente.

10.1.3 SIKA®-PM 500

Primer sistema de proyectado de hormigón de diseño conjunto de la alianza Sika-Putzmeister. Con un alcance de proyectado de 17 m, la Sika®-PM 500, se utiliza en tramos de túneles medianos y grandes, cavernas y pendientes elevadas. El brazo de proyectado automático ofrece una óptima maniobrabilidad. La bomba de hormigón Putzmeister BSA 1005 de doble pistón tiene una capacidad máxima de bombeo de 30 m³/h.

10.1.4 SIKA®-PM 5312

Este equipo compacto está diseñado para montarse en camión de 2 o 3 ejes lo que facilita su transporte por carretera hacia y desde un sitio. Su diseño ofrece al usuario accesibilidad perfecta a sus componentes y la hace fácil de mantener. El brazo de proyectado tiene un alcance de 14 metros. La capacidad máxima de bombeo de la bomba de hormigón es de 30 m³/h.

10.1.5 SIKA®-PM 702

Bomba compacta de hormigón, de doble pistón, para proyectado a mano con el proceso húmedo y de flujo denso de mezclado. Disponible con chasis portátil y bomba para aditivos líquidos.



Fig. 10-1: Sika®-PM 4207



Fig. 10-2: Sika®-PM 500



Fig. 10-3: Sika®-PM 5312

10.2 EQUIPOS DE PROYECTADO DE HORMIGÓN ALIVA

Los equipos y sistemas Aliva de proyectado de hormigón fabricados por Sika están diseñadas y construidas para ser eficaces, fuertes y flexibles y emplean el principio de suministro por rotor. La mezcla seca es alimentada por aire comprimido en un flujo delgado a la boquilla de proyectado, en donde se pueden adicionar y mezclar agua así como otras sustancias líquidas, tales como los aditivos acelerantes. Debido al proyectado de bajo nivel de energía, el proceso de flujo diluido es apto para el proyectado manual. Los equipos Aliva con placas de sellado auto lubricantes también reducen el desgaste de la máquina y así ayudan a optimizar los costos de operación.

10.2.1 Aliva®-237

La AL-237 es un equipo compacto de hormigón proyectado para hormigón proyectado seco, así como para aplicaciones pequeñas de hormigón proyectado de morteros. La baja altura de llenado de la tolva permite fácil manejo de materiales empacados en bolsa con poco esfuerzo. El cambiador de frecuencia integrado permite velocidades infinitamente variables en el rotor y con ello, capacidad de conducción específica para cada tarea. Con una capacidad de conducción de 0.4 – 4.0 m³/h, la AL-237 es apta para todo tipo de trabajos de proyectado seco.

10.2.2 Aliva®-257

La AL-257 es el equipo universal para aplicar hormigón proyectado seco o húmedo en el proceso de flujo diluido. El diseño muy compacto impacta por sus dimensiones, peso y desempeño. Con su bajo peso de poco más de 600 kg y sus pequeñas dimensiones, similares a las de una máquina pequeña de hormigón proyectado, la AL-257 es apta para toda tarea y es fácil de instalar y operar. Con su rango de rendimiento de 0.7 – 9.6 m³/h (con 3 tamaños de rotor), la máquina opera en trabajos pequeños de renovación de hormigón tan eficazmente como en la estabilización de un gran talud.

10.2.3 Aliva®-267

La AL-267 es un equipo multi-funcional para aplicar hormigón proyectado seco y húmedo con el método de flujo diluido o delgado. Su construcción modular permite un correcto uso para todo requerimiento. Con un rendimiento de proyectado de 4 – 21 m³/h, el rango de aplicaciones que cubre incluye construcción de túneles, minería y estabilización de rocas y taludes.



Fig. 10-4: Aliva*-237 Top



Fig. 10-5: Aliva*-257 Top



Fig. 10-6: Aliva*-267 Top
con dosificador integrado

10.3 TBM ALIVA CON ROBOTS PROYECTADORES

Junto con los métodos tradicionales de perforación y voladura y excavadoras estándar, la excavación realizada con máquinas excavadoras de túneles [Tunnel Boring Machines] (TBM), es actualmente uno de los métodos más modernos de construcción de túneles. Una máquina TBM normalmente corta y afloja la roca mediante perforación por percusión, rotación o rotación y percusión. Actualmente se emplean muchas clases de máquinas TBM, según las condiciones geológicas e hidráulicas prevalentes y las dimensiones del túnel.

En principio, construir un túnel con una TBM sigue siempre una misma secuencia:

- a) se prepara la superficie de trabajo con cinceles, cortadoras, etc.
- b) la roca excavada se retira y se lleva a la superficie, y
- c) se realiza el trabajo de estabilización y además se puede revestir la pared del túnel.

Durante la fase c) de estabilización, se pueden instalar segmentos de túnel preformados (unidades prefabricadas de hormigón) o se puede aplicar hormigón proyectado con refuerzo de acero, o ambas cosas.

El equipo robótico de proyectado de hormigón ha sido diseñado y producido para montarse e incorporarse en la TBM con el fin de aplicar hormigón proyectado. Estos grandes sistemas de última generación han sido totalmente diseñados, desarrollados, producidos e instalados por Aliva.



Fig. 10-7: Equipo robótico Aliva* de proyectado de hormigón para máquina TBM

10.4 UNIDADES DE DOSIFICACIÓN ALIVA

Para agregar el acelerante se usan unidades especiales de medición. Para garantizar la calidad del fraguado del hormigón proyectado, la regulación del monto dosificado se debe correlacionar con la cantidad de hormigón; en otras palabras, la unidad de medición debe estar sincronizada con el suministro de hormigón. La unidad de medición también debe cubrir el rango total de dosis de todos los productos utilizados (las dosis mínima y máxima multiplicadas por el contenido de cemento de la cantidad de hormigón proyectado suministrado).

Descripción funcional de las unidades de medición Aliva de acelerantes de hormigón proyectado

El acelerante líquido del hormigón proyectado se alimenta mediante una manguera de succión y entra a la bomba. Dos rodamientos de un rotor comprimen una manguera especial y el contenido de la manguera es conducido por las revoluciones del rotor. A la salida de la bomba, en la válvula, se agrega el aditivo y se mezcla con agua o aire (si se requiere). Un interruptor de presión integral evita que la bomba y los tubos se sobrellenen en caso de bloqueo de la línea. Para aplicaciones menores, los acelerantes pueden agregarse a mano en forma de polvos, pero para ello no hay medición controlada y esto no es viable en aplicaciones mayores.



Fig. 10-8: Corte transversal de una bomba exprimidora



Fig.10-9: Aliva®-403.6 Synchro

11 IMPERMEABILIZACIÓN

11.1 SIKAPLAN® - MEMBRANAS IMPERMEABLES

Para evitar los costos de producción e instalación a la medida de encofrados para revestimientos de hormigón en dilataciones de túneles, se puede usar hormigón proyectado. Con este método, el hormigón proyectado se aplica directamente sobre la membrana impermeabilizante de polímero. Para minimizar el rebote se colocan mallas de alambre fino sobre la membrana impermeable de polímero ya instalada, que se fija con anclajes especiales.

Las membranas impermeables en sí se fijan a una capa de sellante hecha de hormigón proyectado. Esta capa sellante debe nivelar las superficies ásperas y desiguales del sustrato para permitir la colocación de las membranas impermeables sin arrugas ni pliegues, muy fijas al sustrato. La capa portadora de sellante tiene requerimientos técnicos importantes: debe evitarse la formación de protuberancias (nada de fibras de acero); tamaño máximo del agregado ≤ 8 mm, clase de resistencia a la compresión C25/30 y espesor mínimo de la capa ≥ 50 mm. La desigualdades aceptables se describen en la Figura 11-1:

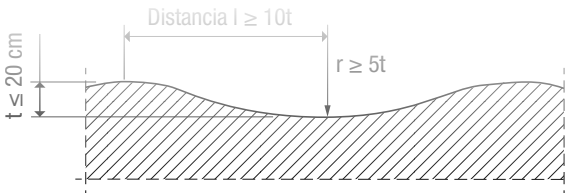


Fig. 11-1: Desnivel de aprobación para la capa portadora del sellado de acuerdo con EAG-EDT

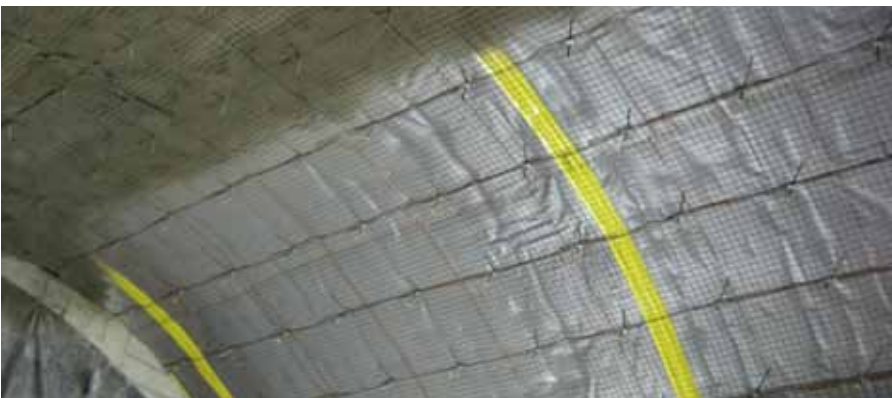


Fig. 11-2: Cubrimiento del Sikaplan® con hormigón proyectado

11.2 FLEXODRAIN W Y SIKA® SHOT-3

Las medias secciones de FlexoDrain W están diseñadas para la construcción de túneles donde recolectan y drenan agua de las rocas. Combinadas con otros componentes de drenajes tales como ramales y recolectores, pueden conformar un sistema de drenaje detrás de la superficie interna y acabado del “casco” del túnel en sí. Las secciones FlexoDrain W se fijan al sustrato con clavos de acero y el área puede revestirse fácilmente con la capa de hormigón proyectado.

Los niveles más bajos de ingreso de agua pueden sellarse con Sika® Shot-3. Sika® Shot-3 es un mortero premezclado con muy alto nivel de resistencia temprana. Esta gunita impermeabilizante especial viene en bolsas ya lista para aplicar mediante el proceso de proyectado seco.

Las secciones FlexoDrain W también pueden fijarse a la roca directamente con mortero Sika® Shot-3 proyectado.



Fig. 11-3: Fijación del FlexoDrain W con Sika® Shot-3

12 GUÍA DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

12.1 PROBLEMAS DE DESEMPEÑO

Tabla 12-1: Guía de solución de problemas de desempeño de hormigón proyectado

Problema respecto a	Enfoque de la solución	Resolución del problema
Compactación	Optimización de la matriz mediante ajuste del diseño de la mezcla	Curva granulométrica constante
		Contenido de finos > 450 kg/m ³
		Agregar aditivos
	Incremento de la energía de compactación	Distancia de la boquilla 1.5- 2.0 m
		Presión de aire 3.5 - 4.5 bar
		Limpieza del cabezal de proyectado
Reacción	Mejorar el fraguado y endurecimiento del hormigón	Verificar el consumo de acelerante
		Reducción del contenido de agua
		Aumentar contenido de cemento
		Aumentar dosis de acelerante
		Cambiar tipo de acelerante
		Usar cemento con alto contenido de C ₃ A
Mezclado	Reducción de la adhesividad	Reducir el contenido de finos
		Aumentar el contenido de agua
		Cambiar tipo de superplastificante
		Reducir la dosis del superplastificante
	Aumentar la homogeneidad	Hacerle mantenimiento al equipo
		Presión de aire a 3.5-4.5 bar
		Usar el rotador del cabezal de proyectado
		Limpiar el cabezal proyectador
Pulsación	Aumentar el llenado del cilindro	Reducir el volumen de hormigón proyectado
		Uso de hormigón de flujo libre (F5-F6)
		Hacerle mantenimiento al equipo
Condiciones	Mejorar el fraguado y endurecimiento del hormigón	Aumentar la temperatura del hormigón
		Proponerse una relación A/C más baja
		Aumentar el contenido de cemento
		Aumentar la dosis de acelerante
		Usar cemento con alto contenido de C ₃ A
		Usar cemento de triturado más fino
Evitar pérdida de temperatura del hormigón		

12.2 PROBLEMAS DE BOMBEO

Tabla 12-2: Guía de solución de problemas de bombeo del hormigón proyectado

Problema relativo a	Enfoque de la solución	Solución del problema
Obstrucción	Aumentar la bombeabilidad	Curva granulométrica [sieve curve] constante
		Aumentar el contenido de finos
		Aumentar el contenido de agua (evitar sangrado!)
		Aumentar la dosis de superplastificante
		Usar SikaPump® (mayor trabajabilidad)
		Reducir volumen del hormigón proyectado (< 10 m ² /h)
		Usar SikaPump®-Start 1 (o mezcla lubricante)
		Aumentar contenido de vacío de aire
		Usar SikaTard® (tp de trabajabilidad mejorado)
		Extensión del tiempo de mezclado para fibras
Operación defectuosa	Análisis de fallas según el manual	Corrección deficiente según la guía de resolución de problemas

13 ÍNDICE

A

Absorción de energía	38
Acelerador de fraguado	21
Acelerante de fraguado sin álcalis	21
Acelerantes	21, 24
Aditivos	16
Aditivos	20
Aditivos para hormigón proyectado	20
Agente lubricante	32
Agregados	18
Agua	20
Agua para mezclar	20
Aire comprimido	70, 73, 75
Alcalinidad	21
Ángulo de proyectado	56
Arena	18
Aseguramiento de calidad	49
Automatización	67

B

Balance de materiales	45, 52
Bomba de hormigón	72, 76
Bombas de pistón	72
Bombeabilidad	31, 85
Boquilla de proyectado	60

C

Cemento	16
Cenizas volantes	17
Clases de resistencia	63
Compatibilidad	27
Hormigón proyectado húmedo	42, 70
Hormigón proyectado seco	50, 73
Conducción / envío / transporte	68
Configuraciones de boquillas	59
Contenido de agua	26
Contenido de cemento	44, 52
Contenido de finos	20, 31
Contenido de humedad	51
Contenido de iones alcalinos	22

Curado	40
Curva gradación hormigón proyectado	48
Conducción / envío / transporte	68
Curado	40

D

Diseño de la mezcla	43, 51
Distancia de proyectado	56
Distancia de proyectado	56, 58
Distancia de las boquillas	56, 84
Dosis de acelerador de fraguado	81
Durabilidad	40

E

Escoria	17
Estabilización de excavación	10
Estabilizadores de consistencia	29
Estabilizadores de la mezcla	30
Éter de policarboxilato	28

F

Fibras	36
Fibras de acero	36
Fibras de polipropileno	36
Fluidez	30

G

Grava / gravilla	18
Guía resolución problemas	84
Gunita	50
Gunita premezclada lista	50, 68

H

Hilti	51
Humo de sílice	17

L

Limpieza 58

M

Máquinas 76, 78

Máquinas de proyectado de hormigón 78

Material de hormigón proyectado I 16, 52

Materiales de base 16

Mecanización 67

Medio ambiente 53

Membranas impermeables 82

Método de penetración de la aguja 62

Método de perforación con perno 62

Método perforación de núcleo 63

Métodos de medición 61

P

Parámetros del proyectado húmedo 56

Polvo 66

Portador del sellador 82

Presión de aire 56, 84

Problemas de desempeño 84

Proceso de flujo denso 70

Proceso de flujo diluido o delgado 73

Proceso de proyectado 68

Proceso de proyectado seco 65

Procesos de proyectado 69

R

Rango de productos Aliva 78

Rango de productos Putzmeister 76

Rango de productos Sika 32

Reacción a los sílices 22

Reacción con aluminato 22

Rebote 52, 65

Reductor de agua 27

Reglas de aplicación 58

Relación agua / cemento 40, 44

Relleno de piedra 17

Relleno de piedra caliza 17, 46

Requerimientos hormigón proyectado 33

Resistencia al fuego 39

Resistencia ASR 41

Resistencia final 34

Resistencia temprana 33, 64

Retardador 29

Retardador de fraguado 29

Revestimiento 14

Robots de proyectado para TBM 80

Rotores 73, 78

S

Seguridad 53

Sistema de drenaje 83

Sistemas de proyectado de hormigón 76

Sombras de proyectado 67

Suavidad 30

Superplastificante 26, 32

Sustrato 54

T

Tiempo de trabajabilidad 26, 29

U

Unidad de dosificación 81
