

Concreto Proyectado en la Construcción de Túneles

Introducción a la tecnología básica
de Concreto Proyectado

Jürgen Höfler
Jürg Schlumpf



Expertos en concreto proyectado



Créditos

Editor

Putzmeister AG
Max-Eyth-Straße 10
D-72631 Aichtal

Autores

Dipl.-Ing. Jürgen Höfler, Putzmeister AG
Jurg Schlumpf, BSC Ingeniero Civil, Sika Schweiz AG

Diagramación

Monika Schübler, Putzmeister AG
Versión Español – Sika Colombia S.A.

Impresión

© 2004 by Putzmeister
Reservados todos los derechos de autor

2. Edición 09/2004
Cargo nominal: 12, – Euros

TS 3452–1 GB

Prefacio

El concreto proyectado es una excelente herramienta en la estabilización y soporte de estructuras en tiempos muy cortos así como para otras aplicaciones en concreto sin formaleta. El concreto proyectado es también una interacción entre hombre, máquina y concreto. Es un material de alto desempeño que funciona sólo bien cuando estos “tres elementos tienen éxito”. El hombre, personificado en el trabajo del lanzador, requiere gran habilidad técnica y dedicación al trabajo. Este debe poder confiar plenamente tanto en la máquina como en el concreto proyectado. Es esa interacción y calidad de los componentes lo que finalmente determina el éxito de la aplicación del concreto proyectado.

En estos días de creciente movilidad y limitación de espacio, la necesidad de infraestructura subterránea continúa aumentando. El concreto proyectado tiene un papel crucial para el logro de este requisito. Este es, un método económicamente ventajoso y casi ilimitado técnicamente, lo que lo convierte en la mejor alternativa.

Sobre éste escenario, **Putzmeister AG** y **Sika AG** han constituido una alianza estratégica global enfocada al concreto proyectado en construcción de túneles y en minería. Dicha alianza garantiza que nuestros clientes podrán ver continuos e importantes desarrollos innovadores de equipos y aditivos para concreto proyectado que responden a una alta exigencia en la colocación altamente mecanizada del concreto proyectado.

Ahora se combina lo mejor en tecnología de concreto y conocimiento de equipos.

En este contexto, las dos compañías han decidido publicar este manual para facilitar a los interesados el paso al fascinante mundo del concreto proyectado en construcciones subterráneas.

Sus autores, Jurg Schlumpf y Jurgen Hofler han trabajado en ambas empresas durante muchos años como ingenieros en gerencia de proyectos y de producto. Se escribe este manual no solo como una introducción al concreto proyectado y sus aplicaciones sino como una profundización en este excelente método de construcción; tiene como propósito servir como fuente de información confiable para nuestros clientes.

Marzo 2004



1. Contenido

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Prefacio | 3 |
| 2. | Introducción | 7 |
| 3. | Usos del Concreto Proyectado | 10 |
| 3.1 | Métodos de construcción de túneles | 11 |
| 3.1.1. | Estabilización | 12 |
| 3.1.2. | Revestimiento | 14 |
| 4. | Tecnología del Concreto Proyectado | 16 |
| 4.1. | Requerimientos del concreto proyectado | 16 |
| 4.1.1. | Materiales constitutivos | 16 |
| 4.1.1.1. | Cemento | 16 |
| 4.1.1.2. | Adiciones | 17 |
| 4.1.1.3. | Agregados | 19 |
| 4.1.1.4. | Agua | 20 |
| 4.1.1.5. | Aditivos para el concreto proyectado | 20 |
| 4.1.2. | Desarrollo de resistencia temprana | 28 |
| 4.1.3. | Resistencia final | 29 |
| 4.1.4. | Concreto proyectado reforzado con fibra | 30 |
| 4.1.5. | Concreto proyectado resistente al fuego | 32 |
| 4.1.6. | Durabilidad | 33 |
| 4.2. | Concreto proyectado vía húmeda | 36 |
| 4.2.1. | Usos | 36 |
| 4.2.2. | Ventajas | 36 |
| 4.2.3. | Concreto proyectado vía húmeda – Diseños | 37 |
| 4.2.4. | Aseguramiento de la calidad | 40 |
| 4.3. | Concreto proyectado vía seca | 41 |
| 4.3.1. | Usos | 41 |
| 4.3.2. | Ventajas | 41 |
| 4.3.3. | Concreto proyectado vía seca – Diseños | 42 |
| 4.3.4. | Contenido de humedad de los agregados | 43 |

1. Contenido

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5. | Aplicando el concreto proyectado | 44 |
| 5.1. | Seguridad | 44 |
| 5.2. | Sustrato del concreto proyectado | 45 |
| 5.3. | El concreto proyectado | 46 |
| 5.4. | Configuración de la boquilla | 48 |
| 5.5. | Evaluación de la resistencia temprana | 51 |
| 5.6. | Rebote | 53 |
| 5.7. | Generación de polvo | 54 |
| 5.8. | Sombras en el concreto proyectado | 55 |
| 5.9. | Mecanización / automatización | 55 |
| 6. | Procesos de proyección | 56 |
| 6.1. | Proceso de proyección vía húmeda | 57 |
| 6.1.1. | Ventajas | 58 |
| 6.1.2. | Equipos | 60 |
| 6.1.3. | Dosificadores | 64 |
| 6.2. | Proceso de proyección vía seca | 65 |
| 6.2.1. | Ventajas | 66 |
| 6.2.2. | Equipos | 67 |
| 7. | Productos Sika Putzmeister para el concreto proyectado | 69 |
| 8. | Índice | 70 |

2. Introducción

Durante el siglo pasado, el concreto proyectado ha reemplazado los métodos tradicionales de revestimiento de túneles y se ha convertido en una alternativa muy importante en la estabilización de túneles excavados. La construcción moderna de túneles sin concreto proyectado es inconcebible. El concreto proyectado es un término único que describe varios componentes de una tecnología completa.

- El material del concreto proyectado.
- El proceso de proyección
- El sistema del concreto proyectado (equipos)

Esos tres componentes definen toda una tecnología que tiene una larga tradición, enorme potencial innovador y gran futuro. El material del concreto proyectado se utiliza en un diseño de mezcla de concreto que esta determinada por los requerimientos de aplicación y los parámetros especificados. Como regla general, esto significa una reducción en el tamaño máximo del agregado a 8 mm o máximo 16 mm, un aumento en el contenido de cementante y el empleo de aditivos especiales para el concreto proyectado que controlan las propiedades del material. Se usó por primera vez en 1914 y desde entonces ha sido desarrollado y mejorado permanentemente a lo largo de las décadas recientes.



Fig. 1 Sika-PM500 PC – Unión temporal para el túnel base TRANSCO tramo Sedrum Gotthard

2. Introducción

Existen actualmente dos procesos diferentes para la aplicación del concreto proyectado:

- **Concreto proyectado vía seca**
- **Concreto proyectado vía húmeda**

Los requerimientos principales de la mezcla se centran en la manejabilidad (bombeabilidad, proyección del concreto) y en la durabilidad:

- Alta resistencia temprana
- Buena bombeabilidad (suministro de flujo denso)
- Adecuadas características de fraguado del concreto
- Diseño de mezcla adecuado para lanzar
- Manejabilidad adecuada para el operario (largos tiempos abiertos)
- Rebote mínimo

El proceso de lanzado determina su colocación. Después de producido, el concreto se transporta por medios convencionales al equipo de lanzado. El concreto o el mortero proyectados es llevado al frente de trabajo por medio de tubos o mangueras sellados y resistentes a la alta presión y es lanzado y compactado. Los siguientes son los métodos disponibles para esta etapa del proceso:

- **Concreto proyectado vía húmeda flujo denso**
- **Concreto proyectado vía seca flujo diluido**
- **Concreto proyectado vía húmeda flujo diluido**

Antes de ser lanzado, el concreto pasa a través de la boquilla a alta velocidad. Se forma un chorro de alta presión y los otros componentes importantes de la mezcla son adicionados, tales como el agua en el caso del concreto proyectado vía seca, aire comprimido en el proceso de flujo denso y acelerantes del fraguado cuando se requieren. La mezcla de concreto proyectado preparada se lanza sobre el sustrato a alta presión lo que hace que se densifique tan poderosamente que se forma al instante una estructura de concreto completamente compactada. Dependiendo del tiempo de fraguado, puede aplicarse a cualquier elevación, incluido verticalmente sobre cabeza.

El proceso de concreto proyectado tiene múltiples aplicaciones. Se usan el concreto o el mortero proyectados para reparaciones de concreto, tunelería y minería, estabiliza-

2. Introducción

ción de taludes y hasta en diseños artísticos de edificios. La construcción en concreto proyectado tiene varias ventajas:

- Aplicación a cualquier altura ya que el concreto se adhiere inmediatamente y sostiene su propio peso.
- Puede aplicarse sobre superficies irregulares
- Buena adherencia al sustrato
- Configuración totalmente flexible del espesor de capa en sitio
- Concreto proyectado reforzado es también posible (refuerzo de fibra o malla)
- Pueden lograrse revestimiento con rápida capacidad de soporte a cargas, sin formaletas o tiempos de espera prolongados.

El concreto proyectado es un método de construcción rápido, flexible y económico, pero requiere un alto grado de mecanización y son esenciales operadores especializados.



*Fig. 2:
aplicación de concreto proyectado vía seca*



*Fig. 3:
aplicación de concreto proyectado
vía húmeda*

3. Usos del concreto proyectado

La construcción con concreto proyectado es usada en muy diversos tipos de proyectos. La flexibilidad y economía de este material sobresale en edificaciones superficiales, túneles y en construcciones subterráneas especiales, de hecho en toda la industria de la construcción. Los siguientes usos son los más difundidos:

- Estabilización de excavaciones en tunelería y construcción subterránea.
- Revestimiento de túneles y cámaras subterráneas.
- Estabilización en la construcción de minas y galerías.
- Reparación de concreto (reemplazo de concreto y reforzamiento).
- Restauración de edificios históricos (estructuras de piedra).
- Trabajos de sello de filtraciones
- Estabilización de zanjas
- Estabilización de taludes
- Revestimiento protector
- Capas de desgaste
- Estructuras especiales portantes livianas.
- Aplicaciones artísticas

En términos de importancia, encabezan la lista la tunelería, la minería y la reparación de concretos. En tunelería y minería, los usos principales son la estabilización de la excavación, y los arcos de revestimiento temporal o permanente. El concreto proyectado se emplea también en otros trabajos, a menudo, por ejemplo, grandes cavidades se llenan con concreto proyectado. Este material ha confirmado y reforzado su posicionamiento junto con las dovelas de revestimiento de túneles (entubado) y el anillo interior de concreto como los principales métodos de colocación de concreto. Las limitaciones de su utilización radican en aspectos técnicos y económicos comparado con los otros procesos de colocación del concreto y/o métodos de construcción.



Fig 4: Laboratorio móvil de concreto proyectado

3. Usos del concreto proyectado

3.1 Tipos de construcción

El concreto proyectado se utiliza en todo tipo de túneles; vehiculares, ferroviarios, drenaje de aguas y estructuras militares subterráneas, adicionalmente está la estabilización de taludes. Ya sea en la construcción de túnel bajo una edificación o excavando a través de algún obstáculo, el método de construcción es determinado por la capacidad de soporte de la roca y la estabilidad del sustrato a través del cual se hace pasar el túnel. La diferencia constructiva principal está entre la excavación de la sección completa y la excavación parcial en muchas formas y métodos diferentes. Si no es posible la excavación de la sección completa debido a la estabilidad de la roca, el perfil final se excava a menudo en varias fases.

En construcción subterránea son requisitos la estabilización y revestimiento debido a que a menudo son inducidos altos esfuerzos y deformaciones en la excavación reciente. Frecuentemente es permitida una deformación predeterminada de la sección excavada y solo después es hecha la estabilización dando un sello no positivo. Esto causa que los esfuerzos sean distribuidos alrededor de la sección de la excavación y en el área alrededor del frente de la excavación.

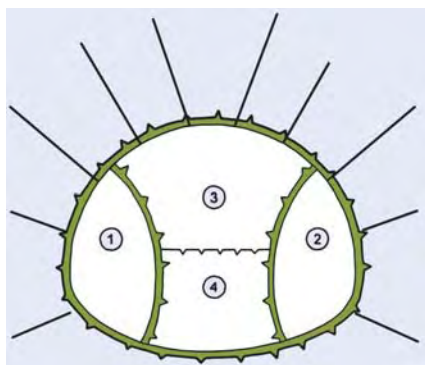


Fig. 5 Avance de las paredes de la galería: iniciando con las paredes de las galerías (1,2), seguido por la excavación de la corona (3) luego la banca y la solera (4) incluyendo un soporte seguro en cada caso.

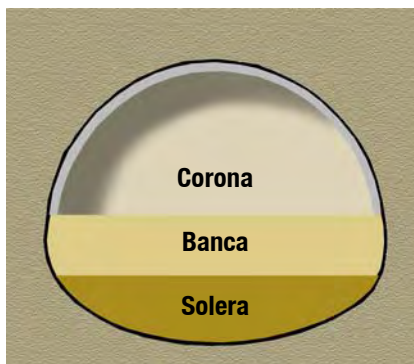


Fig 6. Métodos de avance.

3. Usos del concreto proyectado

3.1.1 Estabilización

El concreto proyectado es el material perfecto para estabilizar excavaciones. Su flexibilidad única en la elección del espesor a ser aplicado, la formulación del material (fibra), el rendimiento, su desarrollo de resistencia a muy temprana edad (en seco y/o húmedo) y la capacidad que tiene de ser proyectado sobre el concreto existente en cualquier momento, hacen del concreto proyectado el material más adecuado para estabilizar excavaciones.

Debe diferenciarse entre excavación total y parcial según la capacidad de soportar carga y la estabilidad del sustrato. La excavación se hace mediante sistema de voladura o por métodos mecánicos. Conforme con el viejo adagio en tunelería: “está oscuro enfrente de la pica”, a menudo sondeos preliminares o túneles piloto estrechos preceden la construcción principal en condiciones de terrenos difíciles. Esos túneles de exploración son incorporados con frecuencia en la excavación del túnel futuro o son empleados como túneles paralelos para diferentes propósitos. En todas estas aplicaciones se usa el concreto proyectado para estabilizar si la superficie excavada no es lo suficientemente estable. Se puede conformar muy rápidamente con concreto proyectado una capa de bajo espesor en forma de una piel delgada. Si las propiedades de soporte de carga del concreto proyectado no son suficientes, se puede mejorar la ca-



Fig 7. Escudo delantero operado por la alianza temporal para la red ferroviaria subterránea de Munich, paquete U2, con sistema de proyección con movimiento hacia arriba como sistema adicional de estabilización.

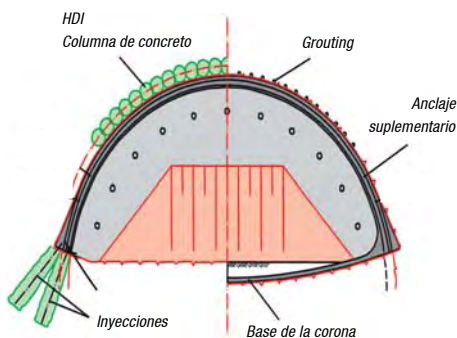


Fig 8. Medidas para soporte de la roca.

3. Usos del concreto proyectado

pacidad de soporte con refuerzo (fibra /acero de refuerzo). Cuando se utilizan anillos de acero y malla, el concreto proyectado se convierte en el entramado entre las vigas. Utilizando pernos las propiedades de soporte de carga del concreto proyectado pueden ser vinculadas con las propiedades de soporte de carga mejoradas del sustrato que se encuentra cerca de la excavación. Si hubiera una alta penetración de agua y/o importante fractura de la roca, inyección e impermeabilización preliminar con gunita y los canales de drenaje crean las condiciones para la aplicación de la capa de concreto proyectado.

Como en todos los métodos de construcción, en la subterránea se ha evolucionado históricamente de acuerdo a las condiciones locales, en este caso las geológicas de cada región. Debido a esto y a la variedad de proyectos involucrados (en sección transversal y longitudinal), se han desarrollado diferentes métodos constructivos.

En excavación parcial estos métodos son el Método Austriaco de Construcción de Túneles (ATM), el método de núcleo Alemán y el método de apuntalamiento Belga. La sección completa se divide en secciones menores que se estabilizan temporalmente y solamente se unen para formar una sección completa al final. En el método de sección completa, los equipos parcialmente o completamente mecanizados tienen un enorme potencial de desarrollo. A largo plazo las restricciones de uso de los equipos de perforación de túneles (TBM) se reducirán solamente a los aspectos económicos. Los equipos de aplicación de concreto proyectado se instalarán permanentemente en máquinas de perforación de túneles.



Fig. 9 Perfil de excavación.



Fig. 10 Método de núcleo Uetliberg

3. Usos del concreto proyectado

3.1.2 Revestimiento

El revestimiento final de un túnel es la carta de presentación permanentemente visible del contratista de túneles. La excepción es el revestimiento final con enchape. Tanto el concreto de revestimiento interior como el concreto proyectado se utilizan para un revestimiento final durable. Entre más alta sea la especificación de uniformidad del acabado del concreto, mas probable es el empleo de concreto de revestimiento estructural con formaletas anulares interiores. Los acabados interiores con formaleta son considerados estéticamente superiores. Aunque son necesarios equipos nuevos en gran escala para este revestimiento, el costo puede compensarse por la economía, dependiendo de la longitud del proyecto. Este método constructivo demanda formaletas anulares internas masivas y equipos para el suministro de concreto, compactación y movilización de formaletas. El concreto producido convencionalmente requiere alta energía de compactación ya que el concreto de revestimiento interior generalmente tiene un espesor significativo, usualmente es complicado el acceso, lo que implica que deben ser usados los llamados vibradores de formaletas, aunque ellos tienen en profundidad un efecto limitado y por lo tanto se requiera un trabajo muy intenso y estarán sujetos al desgaste lo que resulta en contaminación auditiva adicional significativa. Una innovación impor-



Fig. 11 Brazo de proyectado con cabina de proyección.

3. Usos del concreto proyectado

tante es el concreto autocompactante (SCC) el cual tiene una consistencia de flujo libre (manejabilidad) que facilita llenar estas formaleas suprimiendo el proceso de compactación mecánica completamente.

Sin las especificaciones máximas de uniformidad el concreto proyectado es también apropiado para el revestimiento final. Antes del montaje de la membrana impermeabilizante, la superficie del concreto proyectado a menudo se empareja tanto como sea posible con una gunita más fina, con lo que se mejoran bastante las condiciones para la colocación de las membranas impermeabilizantes sin arrugas.

| Revestimiento final durable (Método de construcción) | Ventajas del método seleccionado |
|---|--|
| Revestimiento en concreto proyectado | <ul style="list-style-type: none">· Utilización de la instalación existente para concreto proyectado· Más económicos en túneles cortos· No se necesitan instalaciones adicionales· Funciona como revestimiento final y estabilización· Una sola operación completa |
| Revestimiento en concreto convencional | <p>Mucha mayor precisión en la uniformidad del acabado del concreto:</p> <ul style="list-style-type: none">· Condiciones de aire comprimido en el túnel· Mejor visibilidad· Apariencia más atractiva· Instalación más sencilla <p>Homogeneidad de la calidad del concreto más claramente controlada sin el parámetro de la aplicación del proyectado.</p> <p>Sin el requerimiento de “resistencia a muy temprana edad”, hay mayores opciones en la mezcla de concreto para los requerimientos de durabilidad.</p> |

Comparación del revestimiento final con concreto proyectado y con concreto convencional

4. Tecnología del concreto proyectado

4.1 Requerimientos del concreto proyectado

En este capítulo se describen todos los requerimientos para mortero y concreto proyectado de manera simple y de fácil comprensión. Armados con esta información, los materiales pueden seleccionarse correctamente. Básicamente, esto involucra la elección entre los procesos de proyección en seco o en húmedo, el diseño correcto de la mezcla, la correcta ponderación del desarrollo de la resistencia temprana del material y la durabilidad del material proyectado, basado en los requerimientos.

4.1.1 Materiales constitutivos

El concreto es un sistema de tres materiales, cemento, agregados y agua. Para extender sus propiedades y aplicaciones potenciales puede fácilmente convertirse en un sistema de cinco componentes, resultando en una interacción compleja especialmente cuando se combinan con los parámetros de aplicación del concreto proyectado. Por consiguiente es importante con el concreto proyectado no cambiar demasiados parámetros al mismo tiempo durante la etapa de pruebas. Solamente la solución técnicamente correcta y económicamente viable dejara satisfechos a todos.

4.1.1.1 Cemento

El cemento actúa como un “aglutinante” en la mezcla de concreto proyectado que une y fija las partículas de agregado a través de la matriz. El cemento también es el lubricante principal del concreto proyectado, tiene un fraguado hidráulico y por lo tanto es parcialmente responsable de las propiedades mecánicas del concreto endurecido. Sin embargo, aquí hay un requerimiento importante que no es condición en concreto estructural. El cemento para el concreto proyectado siempre debe empezar a fraguar extremadamente rápido y producir muy alta resistencia temprana.

El cemento que no reaccione bien al combinarse con acelerantes de fraguado o con aditivos de reacción lenta no es apropiado para la producción de concreto proyectado para estabilización del terreno.

El contenido total de finos en una mezcla de concreto proyectado depende de muchos factores y puede ser evaluado como sigue:

4. Tecnología del concreto proyectado

| | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Agregado | 0–8mm | 0–16 mm |
| Redondas | 500kg/m ³ | 450kg/ m ³ |
| Trituradas | 525kg/ m ³ | 475kg/ m ³ |

Tabla de contenido total de finos en un metro cúbico de concreto proyectado.

4.1.1.2 Adiciones

Las adiciones se emplean en concreto proyectado para una variedad de requerimientos por lo que cambian considerablemente en características:

- Para lograr un balance adecuado de finos $\leq 0,125$ mm (relleno)
- Para mejorar propiedades de durabilidad específicas (resistencia a solventes o acción de agresores)
- Para aumentar la capacidad de retención de agua (estabilización de la mezcla)
- Para reducir la presión de bombeo durante el suministro (lubricante)

Se emplean muchos tipos diferentes de finos. Un factor importante en la selección de las adiciones es el económico y por lo tanto la disponibilidad local de estos materiales es la razón por la cual se prefieran diferentes tipos en diferentes sitios.

| Efecto | Tipo de aditivo | Observaciones |
|--------------------|---|---|
| Hidráulico | Cementoso | Tipo y calidad influyen la manejabilidad y desarrollo de resistencias |
| Hidráulico latente | Escoria | Retarda el desarrollo de resistencias e incrementa la durabilidad. |
| Puzolánico | Microsilica Ceniza volante | Mejora la durabilidad, mejora el comportamiento de adherencia y con él las propiedades mecánicas. Reduce el valor del pH del agua intersticial del concreto y por lo tanto debe ser limitada su cantidad. |
| Inerte | Polvo de roca (ej. filtro de caliza) | No desarrollan resistencia por ellos mismos pero ayudan con el mejoramiento de la matriz. |

Efectos de las adiciones en el concreto y el mortero proyectado

4. Tecnología del concreto proyectado

Microsílica

El humo de sílice es SiO2 amorfo, que se da como un sub–producto en la producción de silicona. El material tiene una superficie específica enorme y es altamente reactivo, por lo tanto es técnicamente apto para una variedad de requerimientos. Este no tiene efecto adverso en la resistencia temprana. El humo de sílice es la adición ideal pero su costo es alto.

Ceniza volante

La ceniza volante se obtiene de los filtros en la generación de la electricidad con carbón pulverizado. La ceniza volátil es barata y tiene muy buenas propiedades de manejabilidad. Es también adecuada para requerimientos específicos de durabilidad. La homogeneidad del producto es un factor importante de la ceniza volante.

Escoria

Esta se genera en la fundición de hierro mineral. También es barato y es un excelente relleno, pero reduce la resistencia muy temprana. La durabilidad del concreto proyectado a menudo puede ser mejorada con escoria.

| Característica | Cemento | Humo de Sílice | Ceniza Volante | Escoria | Polvo de Roca Molida |
|--|---------|----------------|----------------|---------|----------------------|
| Características del concreto fresco | | | | | |
| Manejabilidad | ++ | ++ | +++ | + | +++ |
| Capacidad de retención de agua. | ++ | +++ | + | + | +++ |
| Desarrollo de resistencias | | | | | |
| Resistencia muy temprana hasta 4 h. | +++ | + | – | – | +/- |
| Resistencia temprana hasta 12 h. | ++ | ++ | – | – | +/- |
| Resistencia final | ++ | +++ | ++ | +++ | +/- |
| Durabilidad | | | | | |
| Resistencia al agua | ++ | +++ | ++ | ++ | + |
| Resistencia a los sulfatos | – | ++ | +/- | +++ | +/- |
| Resistencia AAR | – | +/- | +/- | +++ | +/- |

Características del concreto y el mortero proyectado con adiciones

4. Tecnología del concreto proyectado

4.1.1.3 Agregados

Los agregados (partículas de piedra) constituyen el esqueleto de la matriz de concreto proyectado. Aproximadamente 75% del volumen es arena y grava. La composición geológica del agregado tiene una fuerte influencia en la manejabilidad y otras propiedades del concreto endurecido. Los agregados tienen diferentes funciones:

- Parámetros principales que influyen en la homogeneidad de la mezcla de concreto proyectado
- Parámetros que determinan el requerimiento de agua
- Llenante de menor costo en la matriz de concreto proyectado
- Consecución de propiedades mecánicas (resistencia a la tensión, flexión y resistencia a compresión)
- Fuerte influencia en la manejabilidad de la mezcla (formas de las partículas y finos)
- Alta influencia en la durabilidad requerida (porosidad y pureza)

Por estas razones debe dársele al agregado la más alta importancia, pero tristemente no siempre es el caso. Si el contenido de finos ≤ 0.125 mm cambia solo en un mínimo porcentaje, una mezcla que es extremadamente manejable puede fácilmente convertirse en una que es imposible de bombear, o si el porcentaje de componentes blandos en el agregado es demasiado alto su resistencia al congelamiento puede ser totalmente destruida. En lo que se refiere a la tecnología del concreto, las curvas de granulometría

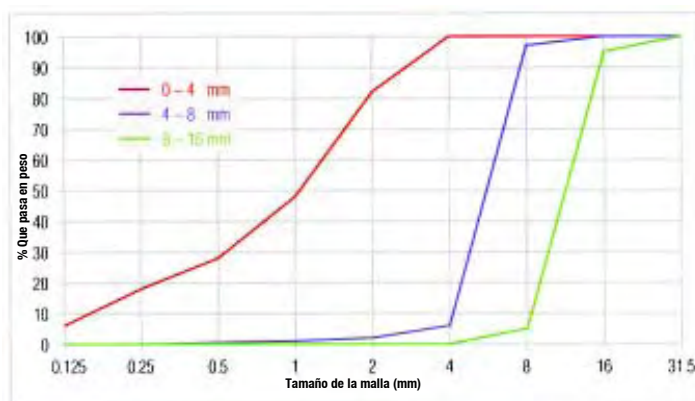


Fig. 12: Distribución de tamaño de partículas de componentes individuales.

4. Tecnología del concreto proyectado

con una partícula de agregado de tamaño máximo de 16 mm son buenas en general, pero en términos del proceso global de aplicación de concreto proyectado el tamaño de las partículas hasta 8mm ofrece ventajas. Las curvas de granulometría para las aplicaciones seca y húmeda de concreto proyectado son mostradas.

4.1.1.4 Agua

El agua va dentro del concreto proyectado como agua añadida durante su producción y como humedad inherente en el agregado. La consistencia (plasticidad) de la mezcla la regula el agua y los aditivos. El agua de mezclado no debe contener ningún componente que retarde o acelere la hidratación. Estos son principalmente:

- Aceite y grasa
- Sales
- Sulfatos
- Azúcares
- Cloruros

El agua natural subterránea, el agua lluvia, el agua de río y de lagos normalmente es adecuada. El agua marina no debe utilizarse debido a su alto contenido de cloruros. El agua potable siempre es adecuada para la producción de concreto proyectado.

4.1.1.5 Aditivos para el concreto proyectado.

Los aditivos para el concreto se utilizan para mejorar y/o cambiar las propiedades del concreto que no pueden o no pueden correctamente ser controladas por los componentes cemento, agregados y agua. Los aditivos pueden ser también adicionados al concreto proyectado durante el proceso de proyección para regular el inicio del fraguado. Los aditivos de concreto hacen que el concreto sea un sistema complejo de múltiples materiales.

Los aditivos de concreto proyectado se adicionan como porcentaje del peso o volumen del cemento. Estos se adicionan en un rango aproximado de 0.5% a 6%. Esto da cantidades de 2 kg/m³ a 30 kg/m³, que esta en el rango de las milésimas partes del volumen total de concreto. Todos los aditivos usados son colocados en el concreto durante su producción en la planta de mezcla después de la medición inicial de agua. Una excepción es el acelerante del fraguado, el cual se adiciona inmediatamente antes del proyectado.

4. Tecnología del concreto proyectado

| Especificaciones del concreto proyectado | Parámetros de control | Aditivos de concreto para el logro del objetivo |
|---|--|--|
| Resistencia a la compresión Resistencia a la tensión en flexión Durabilidad | Características del fraguado del concreto | Agentes controladores del flujo FM Aditivos Adiciones Fibras de Refuerzo Agentes de curado |
| Bombeabilidad Capacidad para ser lanzado Configuración del proyectado | Manejabilidad | Estabilizadores de mezcla ST Adiciones |
| Tiempo de manejabilidad Desarrollo de resistencia | Tiempo de manejabilidad Tiempo de fraguado (aceleración del endurecimiento) | Acelerantes de fraguado Retardantes de fraguado Adiciones |

Especificaciones para la utilización de concretos y morteros proyectados.

La ecología y la seguridad de los aditivos para el concreto proyectado son evaluadas y clasificadas por el sello de calidad EFCA (Federación Europea de Aditivos para el Concreto).

Los diferentes aditivos de concreto proyectado se enumeran a continuación y se describen sus propiedades.

Acelerante:

Los acelerantes controlan el tiempo de fraguado del concreto proyectado después de su aplicación, se utilizan en forma líquida o en polvo. Un factor importante para el control del tiempo de fraguado del concreto proyectado es la estabilidad en la dosificación del acelerante, razón por la cual la utilización de estos aditivos debe hacerse desde unidades dosificadoras que garanticen baja variabilidad de la dosis acorde con el flujo de concreto (sincronización). En términos de calidad, la única excepción, es en aplicaciones menores. Los acelerantes de fraguado se clasifican según su composición química y por consiguiente con su manera individual de acción y efecto en el fraguado del concreto.



www.fshbz.ch
www.efca.info

4. Tecnología del concreto proyectado

| Propiedad | Tipo de acelerante | | |
|---|----------------------------|---------------------------|------------------|
| | Alcalino Base Aluminato | Alcalino Base Silicato | Libre de álcalis |
| Rango de dosificación | 3–6 % | 12–15 % | 4–7 % |
| Valor de pH | 13–14 | 11–13 | 3 |
| Equivalente Na ₂ O | 20 % | 12 % | < 1 % |
| Resistencia muy temprana a la misma dosis | ++++ | ++++ | +++ |
| Resistencia final | + | — | +++ |
| Impermeabilidad al agua | ++ | — | +++ |
| Lixiviación | -- | -- | — |
| Salud ocupacional | — | + | +++ |
| Seguridad ocupacional y transporte | — | + | +++ |

| Tipo | Producto | Uso/efecto | Observaciones |
|--|---------------------------|--|--|
| Acelerante de fraguado líquido, libre de álcalis | <i>Sigunit®AF Líquido</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Estabilización sobre cabeza en túneles • Estabilización de roca y taludes • Revestimiento final de alta calidad • Muy alta resistencia temprana • incrementa la impermeabilidad al agua • Reducción de álcalis • Mejor seguridad ocupacional | <ul style="list-style-type: none"> • Para el proceso de proyectado vía seca o húmeda • No corrosivo • Baja reducción de resistencia final comparado con concreto original no acelerado • No compatible con acelerantes alcalinos • Partes metálicas en contacto con este acelerante deben ser de acero inoxidable |
| Acelerante de fraguado polvo, libre de álcalis | <i>Sigunit®AF Polvo</i> | | |
| Acelerante de fraguado líquido, alcalino | <i>Sigunit®AF Líquido</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Estabilización sobre cabeza en túneles • Estabilización de roca y taludes • Muy alta resistencia temprana • Bajo rebote • Puede ser proyectado sobre sustrato húmedo | <ul style="list-style-type: none"> • Para el proceso de proyectado vía seca o húmeda • Corrosivo • Reducción de resistencia final comparado con concreto original no acelerado |
| Acelerador de fraguado polvo, alcalino | <i>Sigunit®AF Polvo</i> | | |

Tabla de los diferentes tipos de acelerantes y sus propiedades principales

4. Tecnología del concreto proyectado

Esta tabla permite visualizar que solamente los aceleradores de fraguado que no contienen álcalis deberían utilizarse en concreto proyectado de alta calidad y durable, teniendo en cuenta la seguridad de las personas. Los aceleradores de fraguado libres de álcali ofrecen una mejora en la seguridad.

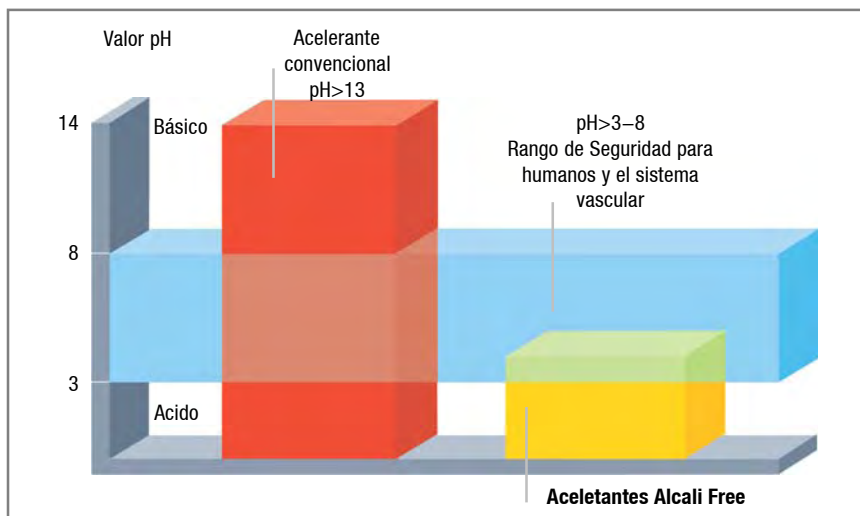


Fig. 13: Lista de aceleradores de fraguado

- **Seguridad en el trabajo:**

Debido al valor del pH de aproximadamente 3, el aire del túnel no contiene neblina, agua o aerosoles cáusticos, por lo que no producen, daños en la piel, membranas mucosas u ojos.

- **Ambiente Seguro:**

Con el empleo de acelerantes alcali free, sustancias altamente alcalinas no son descargadas en el terreno ni en los drenajes de agua.

- **Manipulación segura:**

Los acelerantes de fraguado alcali free no son peligrosos durante el transporte, almacenamiento o dosificación.

4. Tecnología del concreto proyectado

- **Calidad confiable del concreto:**

La utilización de aceleradores libres de álcali minimiza el efecto del endurecimiento acelerado del concreto y mejora la impermeabilidad del concreto proyectado y por consiguiente su durabilidad.

- **Disposición segura:**

Los acelerantes libres de álcali no introducen ningún álcali soluble adicional dentro del concreto. Esto reduce bastante el riesgo de infiltración en drenajes.

- Se definen los aceleradores como libres de álcali si el contenido equivalente de álcali con respecto a su peso es $\leq 1\%$.
- Se definen los productos como alcalinos cuando su valor de pH esta entre 7 y 14.

Aditivos para el concreto proyectado:

Mientras que la resistencia muy temprana y temprana del concreto proyectado se controla colocando acelerantes directamente en la boquilla, los otros aditivos son dosificados durante su producción en la planta de mezcla. Los productos líquidos deben adicionarse con el agua lo más pronto posible. Los aditivos son aun más efectivos si ellos se incorporan después de el agua de mezclado. El tiempo de mezclado para lograr la máxima eficiencia depende del desempeño del producto y de su composición química. Como regla general, un tiempo de mezclado de 60 seg después de la dosificación del aditivo es suficiente. Algunos productos tales como agentes que incorporan aire necesitan un mínimo de 90 segundos pero estos rara vez se emplean en concreto proyectado. Los aditivos se utilizan principalmente en concreto proyectado para mejorar el fraguado del concreto y para controlar las propiedades del concreto fresco (manejabilidad/tiempo de manejabilidad). Hay muchos productos disponibles para esto.

Los productos más importantes empleados en concreto proyectado son los agentes de control de fluidez y aditivos que retardan la iniciación de la hidratación.

Agentes de control de fluidez:

Mejor conocidos como plastificantes y superplastificantes. Los superplastificantes se emplean para controlar el contenido de agua especificado (relación a/c) mientras que se garantiza simultáneamente la consistencia requerida del concreto fresco (plasticidad). Dos intereses diametralmente opuestos en apariencia:

- Un contenido bajo de agua (relación a/c) que garantice la calidad.
- Una consistencia plástica del concreto fresco para una buena manejabilidad de la mezcla.

4. Tecnología del concreto proyectado

| Tipo | Producto | Uso/Efecto | Observaciones |
|--|---|--|---|
| Superplastificantes | <i>Sika Tard</i> <i>SikaViscoCrete</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Alta reducción de agua • Mejor manejabilidad • Manejabilidad con tiempo controlado • Rápido aumento de resistencia • Mejores propiedades de re-tracción y fluencia plástica • Mayor impermeabilidad | <ul style="list-style-type: none"> • Efectos óptimos cuando se adiciona después de la mezcla de agua. • La dosis óptima depende del tipo de cemento. • Para propiedades específicas, son esenciales pruebas preli-minares con el cemento y los agregados a ser usados. |
| Retardadores | <i>SikaTard-930</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Manejabilidad ajustable • Nos es necesario limpiar las bombas y las mangueras durante la etapa de retardo. | |
| Humo de sílice coloidal Humo de sílice en polvo | <i>Sikacrete-L</i> <i>SikaFume</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Mejor homogeneidad del concreto fresco • Mucho mejor Impermeabilidad al agua • Mejor adherencia entre el agregado y el cemento endurecido • Mayor resistencia a las heladas y al congelamiento /descongelamiento. • Menor rebote | <ul style="list-style-type: none"> • Adicionado en la planta de mezcla • Es necesario un curado óptimo ya que el concreto con humo de sílice se seca mucho más rápidamente en la superficie. |
| Humo de sílice en polvo modificado con polímeros | <i>Sikacrete-PP1</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Como SikaFume, más: • Reducción significativa de agua • Para especificaciones de muy alta calidad | <ul style="list-style-type: none"> • Como para el <i>SikaFume</i>. |
| Ayudantes de bombeo y estabilizadores | <i>SikaPump</i> <i>Sika Stabilizer</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Mejoría en homogeneidad y cohesión internas para mezclas de concreto no apropiadas • Aumenta el rendimiento del proyectado con menor consumo de energía, aun en las mezclas con agregados triturados. | La adición aumenta la potencia de la mezcladora y la consistencia del concreto – no ajustar mediante la adición de agua. |

Tabla resumen de aditivos de concreto proyectado

4. Tecnología del concreto proyectado

se logra con superplastificantes, los cuales controlan la manejabilidad mediante dispersión de los finos en una mezcla de concreto proyectado en vez de agua. Existen diferentes generaciones de agentes de control de fluidez y difieren en su capacidad para reducir de agua y las características del proceso. A diferencia de los plastificantes para concreto convencional los productos para concreto proyectado deben tener un largo tiempo de manejabilidad, muy buena bombeabilidad y capacidad de combinarse bien con los acelerantes.

Estabilizadores de consistencia / retardantes de fraguado:

Se pueden adicionar productos especiales a la mezcla de concreto proyectado para controlar (retardar) la hidratación. Estos permiten que el tiempo de manejabilidad del concreto proyectado pueda cambiarse a voluntad, de tal manera que no varíe el rango de 1 a 2 horas. El tiempo puede ajustarse según las condiciones regulando la cantidad de estos retardantes. Las propiedades de los superplastificantes a menudo se combinan con los efectos de los retardantes.



Fig. 14: Equipo para la medición del fraguado

4. Tecnología del concreto proyectado

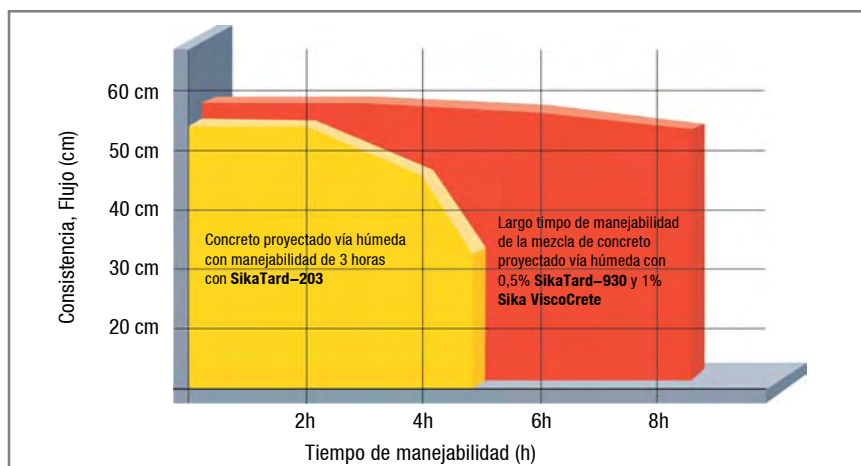


Fig. 15: Tiempo de manejabilidad de mezclas de concreto proyectado vía húmeda.

Ayudantes de bombeo:

Para mejorar la bombeabilidad, a menudo se agregan aditivos especiales a las mezclas que permite solucionar la variabilidad de los finos, una forma difícil o una pobre capacidad de retención de agua de los componentes ≤ 0.125 mm que son tan importantes para el proceso. Los ayudantes de bombeo promueven la cohesión interna e incrementan la cantidad de película lubricante.

Presión de bombeo con /sin agente de bombeo

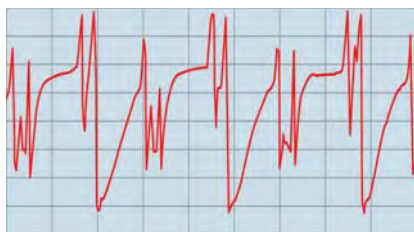


Fig 16: Sin SikaPump:
presión de bombeo discontinua



Fig.17: Con SikaPump:
presión de bombeo continua

4. Tecnología del concreto proyectado

4.1.2 Desarrollo de resistencia temprana

Deben tenerse en cuenta las variables que inciden en el desarrollo de la resistencia temprana, dependiendo del requerimiento del concreto o mortero proyectado, debe hacerse una distinción entre:

- Desarrollo de resistencia muy temprana en el rango de unos pocos minutos hasta una hora.
- Desarrollo de resistencia temprana en el rango de una hora hasta máximo un día.

Después de eso se necesita el desarrollo de resistencia normal, comparable con la del concreto estructural. El desarrollo de la resistencia está influenciado por los siguientes factores:

- Contenido y tipo de cemento
- Contenido de agua
- Temperaturas del concreto y del ambiente (sustrato)
- Grosor de la capa
- En el concreto proyectado está, además, la fuerte influencia del acelerante, que tiene el propósito de aumentar significativamente la resistencia desde los primeros minutos hasta las primeras horas.

El concreto proyectado se utiliza principalmente para estabilización pero también con frecuencia para el relleno de cavidades. El desarrollo de resistencia muy temprana y temprana es especificado para soporte de roca y suelo sobre cabeza.

Desarrollo de resistencia muy temprana

En los primeros minutos después de la aplicación del concreto proyectado, la adherencia es decisiva y determina la tasa de aplicación (grosor), sin embargo, nunca es posible aplicar más concreto proyectado del que el sustrato es capaz de absorber. El desarrollo de resistencia muy temprana define la velocidad de colocación y por lo tanto el desempeño del contratista.

4. Tecnología del concreto proyectado

Desarrollo de resistencia temprana

Una resistencia a la comprensión medible se obtiene después de aproximadamente una hora (en casos especiales o en estabilización inmediata después de tan sólo unos pocos minutos). Este desarrollo de resistencia determina cuando se puede continuar perforando. El desarrollo de resistencia temprana determina el avance del túnel.

4.1.3 Resistencia final

Junto con las resistencias muy temprana y temprana requeridas específicamente en el concreto proyectado, hay requerimientos mecánicos para el concreto proyectado endurecido, así como los hay para el concreto convencional, generalmente a los 28 días. El nivel de resistencia se basa en los requerimientos de diseño. La resistencia a la comprensión se mide sobre núcleos tomados de la estructura o de paneles proyectados. Muestras en cubos del concreto se utilizan para controles, pero estas representan el concreto proyectado aplicado ya que las características pueden cambiar considerablemente debido al proceso de proyección. Los acelerantes de fraguado empleados y la habilidad del operador de la boquilla o lanzador tienen una enorme influencia en la resistencia final obtenida. El concreto proyectado normalmente está diseñado como una piel delgada con capacidad de soporte de carga y por lo tanto deberá poseer cierta ductilidad. Esta pueden lograrse con malla de refuerzo, pero la utilización de fibras para refuerzo de mortero y el concreto proyectado es ideal para la obtención de un material flexible. El concreto proyectado reforzado con fibras de acero es un material de sobresaliente desempeño y capacidad de carga.

Las propiedades del concreto proyectado se evalúan en muestras extraídas directamente de la estructura o de paneles de prueba tomados paralelamente durante la aplicación bajo condiciones de máxima similitud y luego llevadas para muestreo si destruir la estructura. Paneles proyectados con dimensiones definidas se emplean también en la prueba de placa para determinar la resistencia a la tensión y la ductilidad del concreto proyectado reforzado.

4. Tecnología del concreto proyectado

4.1.4 Concreto proyectado reforzado con fibra

El concreto proyectado reforzado con fibra se ha vuelto ahora mucho más importante debido al desarrollo de nuevos y mas efectivos tipos de fibra, su disponibilidad creciente y su inclusión en varios estándares. Puede considerarse que actúa en perfecta combinación con el concreto proyectado. Lo mismo que el concreto convencional, el concreto proyectado es un material frágil con resistencia limitada a la tensión y a la flexión pero con excelente resistencia a la compresión. Ciertamente es posible reforzar concreto proyectado con refuerzo de acero convencional, pero su instalación es muy dispendiosa, toma mucho tiempo y frecuentemente en condiciones críticas en cuanto a seguridad industrial. Además las barras de refuerzo no se adaptan bien al grosor de capa flexible de diseño del concreto proyectado. Por ello tiene sentido utilizar concreto proyectado reforzado con fibra. Sus principales ventajas son:

- Distribución homogénea del refuerzo de fibra en el concreto proyectado
- Incrementando en la ductilidad del concreto proyectado
- Alta resistencia a la tensión y flexión
- Mayor seguridad debido a la deformación postfisuración
- Aumento de la resistencia al impacto
- Mejora de la adherencia
- Reducción de la fisuración por retracción temprana
- Mayor resistencia al fuego



Fig 18: Superficie de falla de dos prismas



Fig 19: Fibras de acero

4. Tecnología del concreto proyectado

En principio, todos los tipos de fibra son adecuados para el concreto proyectado, cuando se emplea en tunelería, la fibra de acero es generalmente más apropiada. La fibra de carbono tiene propiedades ideales pero es completamente inviable económicamente para utilización en concreto proyectado convencional. La fibra de vidrio es adecuada solamente en aplicaciones especiales de partícula fina y tiene que satisfacer requerimientos especiales por su comportamiento a largo plazo. La fibra polimérica se usa principalmente en reparaciones de concreto ya que mejora la cohesión interna del concreto proyectado y reduce la fisuración por retracción durante el desarrollo de resistencia temprana. Las fibras plásticas mejoran la resistencia al fuego del concreto en general. Generaciones modernas de fibras plásticas han aparecido ahora en las aplicaciones tradicionales de la fibra de acero.

La fibra de acero sobrepasa a las barras de refuerzo y a la malla en costo en casi todos los casos.

Las siguientes pautas aplican en la producción de concreto proyectado reforzado con fibra:

- La consistencia del concreto fresco debe ser más plástica de manera que pueda bombearse.
- Como la superficie es más grande el requerimiento de película lubricante y adhesiva es mayor y por consiguiente el contenido de cementante debe aumentarse.
- Las propiedades adhesivas se mejoran mediante el uso de humo de sílice.

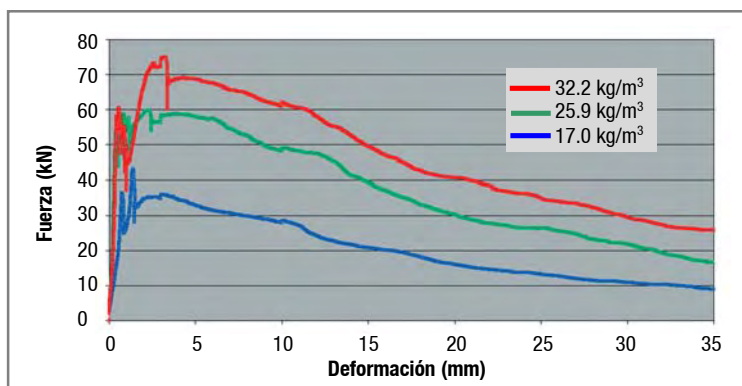


Fig 20: Prueba de placa SIA162/6, fibra de acero Dramix RC-65/35-BN

4. Tecnología del concreto proyectado

- El punto para agregar la fibra depende del tipo de fibra y puede cambiarse si ocurriera algún problema.
- Recuerde que las fibras también se pierden con el rebote y que por lo tanto el contenido y la eficiencia en el concreto proyectado están determinados por este factor y no por la dosis teórica de fibra de acero.

4.1.5 Concreto proyectado con resistencia al fuego mejorada.

La resistencia al fuego del concreto y el mortero proyectado puede mejorarse mediante formulaciones de mezcla complejas. Estos materiales son suministrados generalmente como mezclas de morteros listos y son muy costosos. Entonces es posible satisfacer casi cualquier especificación de resistencia al fuego. Para obtener estas formulaciones todos los componentes deben seleccionarse por su resistencia al fuego y se obtienen soluciones específicas para el agregado en particular.

Sin embargo, puede mejorarse considerablemente la resistencia al fuego a bajo costo incluyendo una capa de sacrificio o desgaste, adicionada con una fibra plástica especial (fibra PP), después del fuego, al descender la temperatura, es una capa delgada que debe reemplazarse.

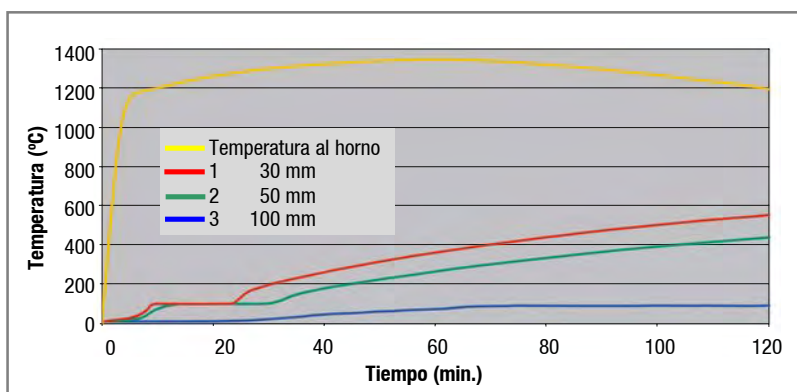


Fig 21: Resistencia al fuego del concreto proyectado con fibras PP evaluado por RWS/especificación TNO

4. Tecnología del concreto proyectado

4.1.6 Durabilidad

La cantidad de agua en una mezcla afecta en mucho todas las propiedades del concreto endurecido y es el factor que más influyen en la durabilidad. El concreto proyectado no es la excepción a más bajo contenido de agua en una mezcla mayor es la durabilidad del material, pero solamente si se combina con un curado adecuado. El parámetro de análisis es la relación agua/cemento o la relación agua/cementante. Esta relación esta muy influenciada por el agregado por lo cual los límites de contenido de agua están en función de los materiales disponibles.

- **Relación agua/cemento < 0.55 para concreto con especificación baja**
- **Relación agua/cemento < 0.50 para concreto con especificación media**
- **Relación agua/cemento < 0.46 para concreto con especificación alta**

Tanto el contenido de agua, como la del agregado y la del aglutinante influyen la durabilidad. Además, el concreto proyectado esta sujeto a la influencia del fraguado temprano y muy temprano, lo cual es usualmente controlado mediante un acelerante de fraguado o un cemento especial. Los acelerantes de fraguado tradicionales reducen la resistencia final, esta es una de las razones que favorece la utilización de acelerantes libres de álcali en la producción de concreto proyectado durable. El uso de humo de sílice incrementa la densidad de la micro estructura del concreto y aumenta la adherencia entre el agregado y la matriz de cemento endurecida. Un concreto proyectado formulado correctamente puede satisfacer todos los requerimientos de durabilidad que se busca en el concreto convencional.

De la misma forma que con el concreto colocado convencionalmente, el concreto proyectado es tan bueno como sea su curado, sin embargo, el proceso de curado es mucho más difícil, fundamentalmente porque las corrientes de aire actúan en la superficie secando el concreto proyectado durante las primeras horas, mientras que el concreto fundido en sitio esta protegido por la formaleta. El humedecimiento regular de la superficie ayuda, pero es muy complicado llevarlo a la práctica en el túnel, el cubrimiento con una máquina de curado móvil es también difícil en la construcción con concreto proyectado. Hay productos llamados agentes de curado interno recientemente desarrollados; estos pueden agregarse al concreto proyectado durante su producción y una vez integrados desempeñan la función de curado.

4. Tecnología del concreto proyectado

| COMPONENTE | DESIGNACIÓN | PRODUCTO | CONTENIDO |
|---|---|-------------------------|-----------------------|
| Cementante | CEM I 42,5 ó CEM I 52,5 CEM III/A 32,5 ó CEM II/A–D 52,5 | | 430 kg/m ³ |
| | Humo de sílice | <i>SikaFume®</i> | 30 kg/m ³ |
| Agregado | Arena 0 / 4 mm redondeada/triturada | | 60 % |
| | Grava 4/ 8 mm redondeada/triturada | | 40 % |
| Contenido de agua | A/C | 0,46 | 211 l/m ³ |
| Aditivos para el concreto proyectado | Superplastificante | <i>Sika®ViscoCrete®</i> | 1.20 % |
| | Retardante | <i>Sika®Tard</i> | 0.30 % |
| | Ayudante de bombeo | <i>Sika®Pump</i> | 0.50 % |
| | Acelerante | <i>Sigunit®–L–AF</i> | 3.00% a 6.00 % |

Ejemplo de diseño de mezcla para concreto proyectado de alto desempeño

| PARAMETRO OBJETIVO | MEDIDA | PRODUCTO |
|---|--|--|
| Aumentar la resistencia a la compresión | <ul style="list-style-type: none"> • Contenido reducido de agua • Utilización de humo de sílice | <i>Sika®ViscoCrete®FM</i> <i>SikaFume®–TU</i> |
| Mejorar la impermeabilidad al agua | <ul style="list-style-type: none"> • Contenido reducido de agua • Utilización de humo de sílice | <i>Sika®ViscoCrete®FM</i> <i>SikaFume®–TU</i> |
| Mejorar la resistencia al congelamiento | <ul style="list-style-type: none"> • Contenido reducido de agua • Utilización de humo de sílice | <i>Sika®ViscoCrete®FM</i> <i>SikaFume®–TU</i> |
| Mejorar la resistencia a Sulfatos | <ul style="list-style-type: none"> • Contenido reducido de agua • Utilización de CEM resistente a sulfatos y/o uso de humo de sílice • Dosificación minimizada de acelerante | <i>Sika®ViscoCrete®FM</i> <i>SikaFume®–TU</i> <i>Sigunit®–L–AF</i> |
| Aumentar la resistencia AAR | <ul style="list-style-type: none"> • Contenido reducido de agua • Utilización de cementante con bajo equivalente Na₂O • Utilización de agregados con bajo potencial AKR • Dosificación minimizada de acelerante | <i>Sika®ViscoCrete®FM</i> <i>Sigunit®–L–AF</i> |

Medidas para cambiar las características del concreto proyectado

4. Tecnología del concreto proyectado

Como en cualquier actividad en la que esté involucrado el factor humano, la calidad del concreto proyectado colocado depende de la gente, en este caso del operador de la boquilla y del supervisor de turno. Ninguna de las medidas preliminares puede alcanzar sus propósitos a menos que se implementen correctamente en sitio. Pero a los operarios deben dárseles las condiciones de trabajo adecuadas.

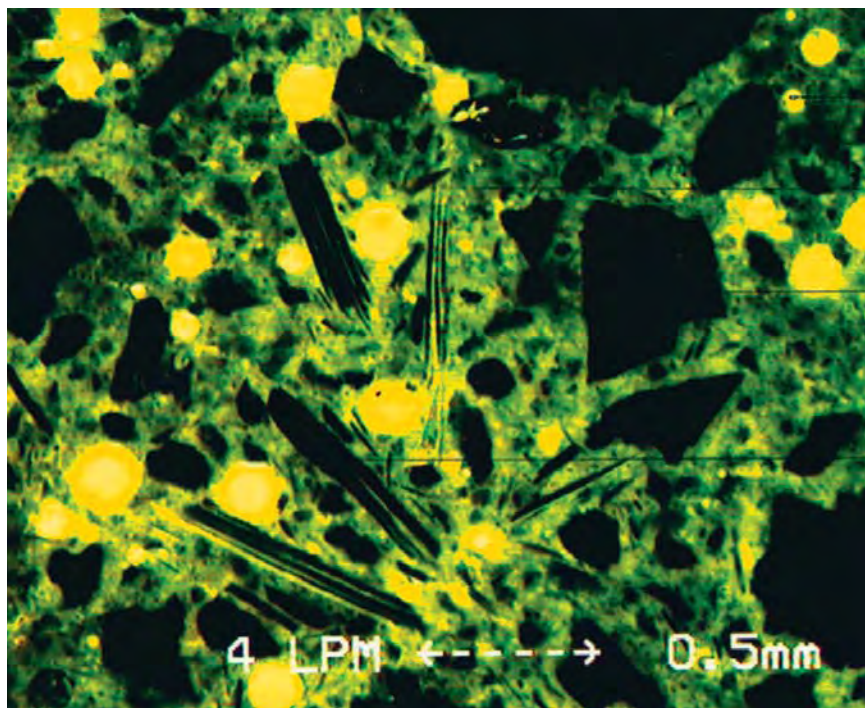


Fig. 22: Análisis de sección delgada, LPM AG Suiza

4. Tecnología del concreto proyectado

4.2 Concreto proyectado vía húmeda.

El concreto proyectado vía húmeda implica el suministro de una mezcla lista y manejable de concreto proyectado compuesta por agregado, cemento, agua y aditivos de concreto proyectado. Para la proyección por vía húmeda se mezcla con aire y con acelerantes de fraguado. El concreto proyectado vía húmeda puede transportarse en flujo denso o flujo diluido. El concreto proyectado por flujo denso es el proceso más reciente y permite alto desempeño.

4.2.1 Usos

El concreto proyectado vía húmeda se emplea siempre que se especifique alta calidad del concreto endurecido y que se requiera alto rendimiento. Este proceso es de lejos el más popular en tunelería mecánica. Sin embargo, la elección del proceso está determinada por las preferencias del contratista.

Las principales aplicaciones del proceso de concreto proyectado vía húmeda son:

- Alto rendimiento en trabajos de concreto proyectado.
- Mejoras sustanciales de las condiciones de trabajo en el área de proyección.
- Mayor durabilidad debido al control de la cantidad de agua de la mezcla.

4.2.2 Ventajas

Las ventajas en el proceso de proyectado vía húmeda cubre varias áreas diferentes. El concreto proyectado vía húmeda es el método más moderno y eficiente.

- Aumento del rendimiento, hasta 25 m³/h en algunos casos.
- Nivel de rebote reducido en un factor de 2 a 4
- Mejoras sustanciales en las condiciones de trabajo debido a una menor emisión de polvo.
- Reducción de costos por desgaste en el equipo de proyección.
- Bajo requerimiento de aire durante la proyección.
- Mejor calidad del concreto proyectado colocado (contenido constante de agua)

4. Tecnología del concreto proyectado

El concreto proyectado vía húmeda flujo denso demanda más trabajo al comienzo (arranque) y al final (limpieza) del proyectado que en el proceso vía seca. También el tiempo de manejabilidad es predeterminado durante la producción y el concreto proyectado debe aplicarse dentro de este lapso, sino habrá un desperdicio de concreto.

4.2.3 Diseño de la mezcla de concreto proyectado en húmedo

El diseño de la mezcla del concreto proyectado vía húmeda depende de los requerimientos de la especificación y de la manejabilidad esperada, en otras palabras de los siguientes parámetros:

- Las especificaciones del concreto endurecido (resistencia a la compresión/durabilidad).
- El concepto logístico a utilizarse (métodos de manejo/condiciones de temperatura)
- Las condiciones especificadas del material colocado (desarrollo de la resistencia temprana y muy temprana)
- Los costos de la mezcla de concreto proyectado vía húmeda.

Con base en todos estos parámetros se seleccionan el tipo de cemento y su contenido, el tipo de agregado y su gradación, el contenido de agua y el tipo y cantidad de aditivos de concreto proyectado y se evalúan mediante ensayos que confirman el diseño o se adaptan de acuerdo a los resultados.

Formulaciones típicas de concreto proyectado vía húmeda se detallan más adelante.

Los agregados disponibles localmente son el principal factor para determinar la elegancia de la curva de gradación. La curva que mejor satisface los requerimientos mencionados debe establecerse por ensayo y experiencia con el material granular disponible. La sustitución del agregado es tan sólo una opción en circunstancias excepcionales por los costos (transporte de grandes cantidades). Los diagramas a continuación dan ejemplos para definir la curva de gradación basado en un cernido de los componentes individuales.

4. Tecnología del concreto proyectado

| Mezcla de proyectado vía húmeda flujo denso 0–8 mm | | |
|--|----------------|---------------|
| Cemento | 425 kg | 135 l |
| <i>SikaFume® HR / –TU</i> | 20 kg | 9 l |
| <i>Sika®Tard (FM) / Sika®ViscoCrete® (FM)</i> | 1.2% | |
| <i>Sika®Tard – 930 (VZ)</i> | 0.3% | |
| Agregado: | | |
| 0 – 4 mm con 4% humedad inherente (60%) | 967 kg | 358 l |
| 4 – 8 mm con 2% de humedad inherente (40%) | 791 kg | 293 l |
| Agua agregada (A/C = 0.47) | 155 kg | 155 l |
| Vacios de aire (4.5 %) | | 45 l |
| Fibra de acero | 40 kg | 5 l |
| Concreto proyectado | | 1000 l |
| Densidad por m³ | 2398 kg | |
| 1 m³ de concreto proyectado colocado en la pared | | |
| Acelerado con <i>Sigunit® AF</i> líquido (rebote 6 – 10%) 0.90 – 0.94 m³ | | |
| Contenido de cemento en concreto proyectado 450 – 470 kg/m³ | | |
| Contenido de fibra de acero en concreto proyectado aprox. 30 kg/m³ | | |

Diseño de mezcla de concreto proyectado vía húmeda, flujo denso

| Mezcla de proyectado vía húmeda flujo diluido 0–8 mm | | |
|---|----------------|-------|
| Cemento | 400 kg | 127 l |
| <i>Sika®Tard (FM) / Sika®ViscoCrete® (FM)</i> | 1.2% | |
| <i>Sika®Tard – 930 (VZ)</i> | 0.3% | |
| Agregado | | |
| 0 – 4 mm con 4% humedad inherente (50%) | 891 kg | 330 l |
| 4 – 8 mm con 2% de humedad inherente (50%) | 891 kg | 330 l |
| Agua agregada (A/C = 0.47) | 168 kg | 168 l |
| Vacios de aire (4.5%) | | 45 l |
| Concreto proyectado | | |
| Densidad por m³ | 2350 kg | |

Diseño de mezcla de concreto proyectado vía húmeda flujo diluido

4. Tecnología del concreto proyectado

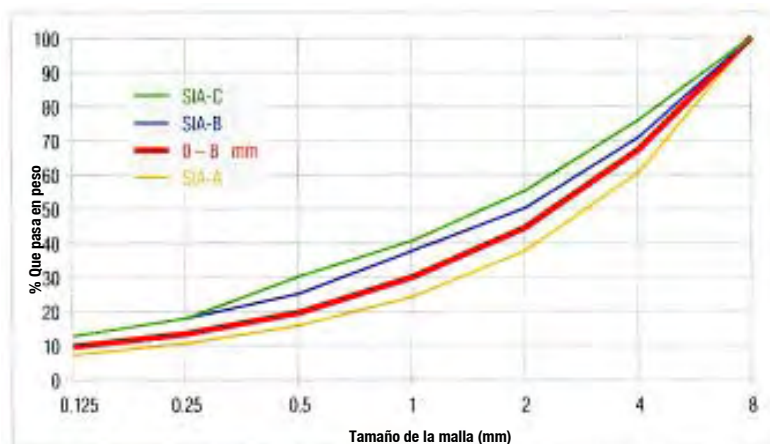


Figura 23: Curva de gradación de concreto proyectado vía húmeda flujo denso

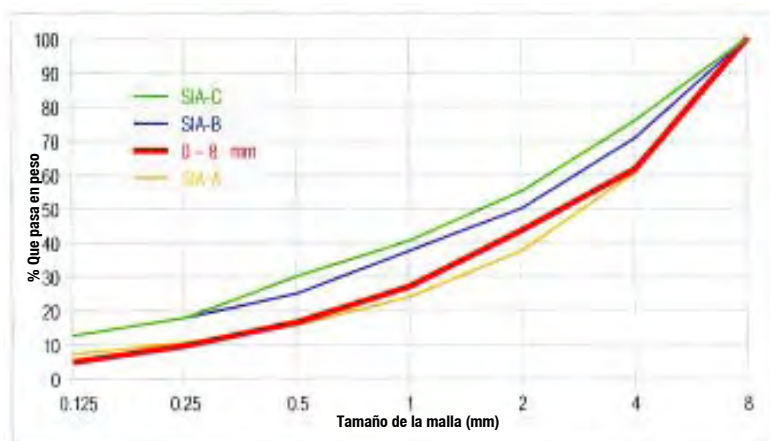


Figura 24: Curva de gradación de concreto proyectado vía húmeda flujo diluido

4. Tecnología del concreto proyectado

4.2.4 Aseguramiento de calidad

El contratista debe suministrar un plan de aseguramiento de calidad como parte de los ensayos de calificación (ensayos iniciales) y también para el aseguramiento de calidad regular. Debe incluir todos los parámetros relevantes de calidad y confiabilidad de una manera lógica y debe estructurarse de manera práctica para que resulte un trabajo eficiente en costos y de este manera implemente efectivamente el plan propuesto. El aseguramiento de la calidad deberá definir el proceso completo.

| Proceso | Etapas | Parámetro de prueba | Frecuencia |
|------------------------|--|---|---|
| Componentes | Agregados | Humedad Curva de gradación Composición de partículas | Cada suministro/bachada Periódicamente |
| | Cemento/adiciones | Documentos de suministro | Cada suministro/bachada |
| | Aditivos de concreto | Documentos de suministro | Cada suministro/paquete |
| Producción de concreto | Planta de mezcla | Equipos de pesaje/mezcla | Según plan de mantenimiento |
| | Producción de concreto | Consistencia en la producción (carga de la mezcladora) | Cada suministro/bachada |
| | | Inspección del concreto fresco Contenido de agua Densidad del concreto fresco Temp. (concreto/aire) Consistencia Contenido de aire | Periódicamente |
| Transporte | Equipo de mantenimiento | Mantenimiento | Según plan de mantenimiento |
| Aplicación | Equipos para la proyección de concreto | Mantenimiento: Partes de desgaste Aire / concreto Dosificación del acelerante | Según plan de mantenimiento |
| | Concreto proyectado | Consistencia Resistencia muy temprana Resistencia temprana Resistencia final Durabilidad | Diariamente Según rata de colocación Según rata de colocación Según rata de colocación Según rata de colocación |

Aseguramiento de calidad

4. Tecnología del concreto proyectado

4.3 Concreto proyectado vía seca

El concreto proyectado vía seca es una mezcla lista de concreto proyectado compuesta por agregado, cemento, cualquier aditivo de concreto proyectado sin agua. Esta mezcla lista está o completamente seca (polvo seco) o está humedecida por la humedad del agregado. Para la operación de proyectado, el concreto proyectado vía seca se mezcla con agua y acelerantes de fraguado en la boquilla y luego se aplica. En el proceso de lanzado vía seca en lugar de aceleradores de fraguado pueden usarse cementos especiales de rápido endurecimiento que fraguan en muy corto tiempo después de humedecerlos con agua. El proceso de flujo diluido debe emplearse para el suministro del concreto proyectado vía seca. Este es un proceso que ha demostrado por mucho tiempo ser exitoso y está continuamente en desarrollo y mejoramiento.

4.3.1 Usos

El concreto proyectado vía seca se emplea siempre que se requieran bajos rendimientos y cuando es esencial alta resistencia muy temprana, por ejemplo, para sello preliminar contra alta penetración de agua con gunitas, sin embargo, la elección del proceso está determinada por las preferencias del contratista.

Aplicaciones del concreto proyectado vía seca y mezclas de gunitas listas:

- Reparaciones de concreto.
- Sello preliminar contra alta penetración de agua
- Obras menores de proyectado
- Obras de impermeabilización
- Conceptos logísticos no dependientes del tiempo (almacenamiento local)

4.3.2 Ventajas

Las ventajas del concreto proyectado vía seca radican en su flexibilidad. Es el método tradicional para aplicar el concreto proyectado y el más conocido en el mundo.

- Alta resistencia muy temprana para sello preliminar o estabilización
- Tiempo de almacenamiento (disponibilidad) casi ilimitado incluso en silos
- No hay desperdicio de concreto

4. Tecnología del concreto proyectado

Con el concreto proyectado vía seca se afectan los costos por el alto rebote, la emisión de polvo y los costos de las piezas de desgaste.

4.3.3 Diseño de la mezcla de concreto proyectado vía seca

El diseño de la mezcla del concreto proyectado vía seca depende de nuevo de los requerimientos. Sin embargo, además de las especificaciones de resistencia temprana, la necesidad de optimizar la generación de polvo y el rebote son esenciales para que el concreto proyectado vía seca sea económicamente eficiente.

Con base en todos estos parámetros se seleccionan el tipo de cemento y su contenido, el tipo de agregado y su gradación, el contenido de agua (humedad) y el tipo y cantidad de aditivos de concreto proyectado. Se evalúan mediante ensayos que confirman el diseño o se adaptan de acuerdo a los resultados, formulación típica de concreto proyectado vía seca se detalla más adelante.

| Mezcla de proyectado vía seca 0–8 mm | |
|--|-------------------------|
| Cemento | 288 kg. |
| SikaFume®– HR / – TU | 20 kg. |
| Sika®Tard – 930 (VZ) | 0.3% |
| 55% 0 – 4 mm con 4% de humedad | aprox. 680 kg. |
| 45% 4 – 8 mm con 2% de humedad | aprox. 560 kg. |
| Humedad de la mezcla seca m³ | *aprox. 1540 kg. |
| *Debe ser verificada | |
| Contenido de cemento | |
| Por cada 1000 lts de mezcla seca, se agregan 280 kgs de cemento a 800 lts de agregado | |
| Por cada 1250 lts de mezcla seca, se agregan 350 kgs de cemento a 1000 lts de agregado | |
| 1 m³ de concreto proyectado en la pared da: | |
| Acelerado con <i>Sigunit® AF Polvo</i> (rebote 16 – 20%) 0.58 – 0.61 m³ | |
| Acelerado con <i>Sigunit® AF Líquido</i> (rebote 20 – 25%) 0.55 – 0.58 m³ | |
| Contenido de cemento en el concreto proyectado es aprox. 450 kg/m³ | |

Diseño de mezcla de concreto proyectado vía seca

El agregado disponible localmente es el principal factor para determinar la escogencia de la curva de gradación. La curva que mejor satisface los requerimientos mencionados debe establecerse por ensayo y experiencia con el material granular disponible. Mezclas listas secadas en horno de productores de mortero proyectado se utilizan frecuentemente en concreto proyectado vía seca y particularmente para las aplicaciones de mor–

4. Tecnología del concreto proyectado

tero proyectado vía seca, esto es gunitas. Estas gunitas son suministradas en sacos o mediante equipo de silos y se almacenan en silos intermedios antes de su utilización, de manera que no es dependiente del agregado que pueda obtenerse localmente. Para la producción en sitio el diagrama de la figura 25 sirve para definir la curva de gradación basada en el cernido de los componentes individuales.

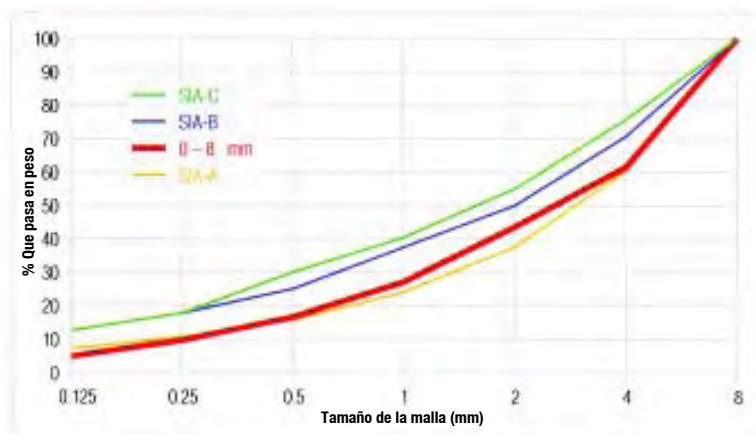


Figura 25: Curva de gradación del concreto proyectado vía seca

4.3.4 Contenido de humedad de los agregados

En el proceso vía seca, la humedad inherente del agregado es clave para la generación de polvo y la capacidad de bombeo. Si el material es demasiado seco se generan grandes cantidades de polvo. Por otro lado, si el material es muy húmedo, se bloquea (se tapa) el sistema de bombeo. El contenido de humedad de los agregados debe ser mantenido entre 2% y 5% u obtenido por medio de instalaciones de humedecimiento especiales. Mezcla seca producida localmente en la planta mezcladora siempre posee alguna humedad ya que es muy difícil conservar el agregado completamente seco. Los morteros y concretos proyectados listos para usar deben ser previamente humedecidos para reducir el polvo generado.

5. Aplicando el concreto proyectado

5.1 Seguridad

La seguridad es un concepto básico en la industria de la construcción, pero particularmente en la colocación del concreto proyectado, ya que combina maquinaria altamente eficiente (hidráulica/neumática/electrónica) con un método de aplicación en el cual se lanza el concreto con aire. Sus usuarios y la gente en la vecindad inmediata debe estar protegida. Los riesgos son:

- **Transporte:** El concreto proyectado es transportado en vehículos grandes, usualmente en espacios confinados con poca luz: las precauciones personales incluyen permanecer visibles con suficiente anticipación; vestir ropas protectoras de alta visibilidad; contar con iluminación apropiada en el vehículo (y limpiar los focos); señal de alarma audible para dar reversa.
- **Transferencia del concreto:** Vigilancia para prevenir el acceso a la unidad transportadora; equipo de protección personal (gafas protectoras contra salpicaduras).
- **Acarreo** del concreto proyectado, acelerantes de fraguado y aire en el punto de la aplicación: mantenimiento frecuente del equipo de acuerdo con un plan (particularmente deben verificarse los tubos y mangueras de transporte); entrenamiento apropiado del personal técnico y de los mecánicos; equipo de protección para el personal; iluminación adecuada del lugar.
- **En la aplicación** del concreto proyectado: el equipo del personal (a prueba de impacto, gafas protectoras, casco, guantes, mascarillas de respiración, protectores de oídos, botas de seguridad y indumentaria que proteja todo el cuerpo); entrada prohibida a áreas desprotegidas ó recientemente lanzadas; iluminación apropiada.
- **Personal no activo** debe permanecer fuera del área de lanzado. Si están, deben utilizar el mismo equipo protector del personal activo.

Uno de los riesgos más serios es sin duda el concreto recientemente lanzado o sustrato inestable que pueda caer sobre los trabajadores, la mala utilización de equipo e instalaciones eléctricas, hidráulicas y o neumáticas y la negligencia cuando se olvida colocarse los elementos de protección personal como las gafas protectoras.

5. Aplicando el concreto proyectado

5.2. Sustrato de concreto proyectado

El vínculo entre el concreto proyectado y el sustrato resulta efectivo solamente si la calidad de las dos superficies de contacto es buena, el alto contenido de cementante y la velocidad de impacto del lanzado, hace que el concreto proyectado tenga las condiciones apropiadas para un adecuado anclaje y una alta adherencia, por consiguiente la otra cara del contacto, es decir el sustrato, generalmente es el factor clave en la unión. Cuando el concreto hace las veces de sustrato debe tener una superficie rugosa, lo cual se obtiene con un acabado de concreto proyectado rústico. La superficie debe estar, además, libre de partículas con baja adhesión, esta debe remojarse para prevenir que el área de adhesión se seque debido al efecto de absorción del concreto. Lo mismo aplica en principio para las superficies recientemente excavadas, 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 en la superficie de adhesión. El sustrato debe estar siempre libre de polvo.

- Limpiar la superficie de contacto (polvo/secciones sueltas)
- Sustrato húmedo (de acuerdo con la capacidad de absorción del sustrato)
- Aplicación correcta del concreto proyectado/mortero (perpendicular al sustrato)

Para optimizar las operaciones, la superficie puede limpiarse con un compresor de aire desde la unidad de lanzado, luego enjuagarse y remojarse con agua corriente. Esta tarea debe hacerse inmediatamente antes del lanzado para prevenir que se forme una capa aislante de polvo inmediatamente después. Lo mismo aplica si el concreto proyectado se pone capa por capa. Es necesario presellar o descargar agua a través de los canales de drenaje si hay una penetración de agua elevada.

5. Aplicando el concreto proyectado

5.3 Lanzado

El concreto y/o mortero proyectados se aplican en capas, bien sea en la misma operación mediante lanzado repetitivo sobre la misma área o en una operación subsecuente. Después de una larga pausa debe limpiarse y remojarse nuevamente la superficie. Las cantidades que deben aplicarse en cada operación dependen de varios factores:

- Adherencia de la mezcla de concreto proyectado (cemento/tamaño máximo de partícula / acelerante)
- Naturaleza del sustrato o de la capa de la base
- Proceso del lanzado
- Volumen de Lanzado
- Dirección del lanzado (hacia arriba/horizontalmente)
- Obstrucciones (refuerzo/agua)

Se requiere un enfoque diferente para las diversas direcciones del Lanzado.

Al lanzar hacia abajo, se pueden aplicar capas de cualquier grosor. Hay que asegurarse de que el rebote sea absorbido o desechado para que no se quede sobre la superficie.

Al lanzar horizontalmente se puede ir alcanzando el grosor gradualmente en capas delgadas o el grosor completo puede aplicarse desde abajo hacia arriba en dirección inclinada. Aquí nuevamente debe retirarse el material que rebota en el fondo antes de aplicar la siguiente capa.



Figura 26 Lanzado aplicado manualmente



Figura 27 Brazo de Lanzado automático en operación.

5. Aplicando el concreto proyectado

Al lanzar en la clave el peso del material y la adherencia del concreto proyectado se anulan entre sí de manera que deben hacerse capas más delgadas. Como regla general un volumen menor de lanzado y capas más delgadas generan menos rebote lo que a la final da mejor resultado. El rebote no constituye problema en este caso.

El concreto proyectado debe aplicarse en ángulos rectos con respecto al sustrato o el concreto colocado. Esto maximiza la adherencia y la compactación y minimiza el rebote. El concreto o mortero proyectado se aplican de manera mecánica o manual en movimientos circulares uniformes sobre la superficie. Es particularmente difícil y requiere experiencia lanzar sobre refuerzos porque las cavidades son muy frecuentes debido a los desniveles en el lanzado. Este problema se evita utilizando concreto proyectado reforzado con fibra de acero.

La distancia óptima para lanzar es de 1.2 a 1.5 mts pero a menudo se hace dentro del rango de 1 a 2 mts. A distancias mayores aumentan el rebote y la generación de polvo con lo que se reduce la eficiencia de la aplicación.



Figura 28 Manejo de la boquilla para regularizar la superficie lanzada.

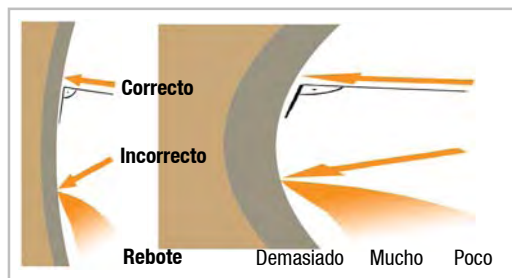


Figura 29 La influencia del ángulo de lanzamiento en el rebote.

5. Aplicando el concreto proyectado

5.4 Configuraciones de la boquilla

Estas configuraciones determinan las maneras en que pueden mezclarse e introducirse dentro de la manguera principal los elementos necesarios para la aplicación. A continuación se relacionan los elementos que intervienen en los diferentes procesos antes de la aplicación:

| Lanzado de concreto vía húmeda flujo denso | Lanzado de concreto vía húmeda flujo diluido | Lanzado de concreto vía seca flujo diluido |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Aire (medio de transporte)• Acelerante de concreto proyectado. | <ul style="list-style-type: none">• Acelerante de concreto proyectado (con aire como medio transportador). | <ul style="list-style-type: none">• Agua (medio de transporte)• Acelerante de concreto proyectado. |

La configuración de la boquilla depende del proceso y los acelerantes elegidos. Los alcalinos se agregan preferiblemente de 2 a 5 m. antes del extremos de la boquilla ya que estos requieren cierto tiempo de reacción para obtener mejores resistencias tempranas. A causa de la discontinuidad del chorro generada por la bomba duplex, los acelerantes alcalinos liberan vapor y aerosol de agua cáustica dentro del túnel, la aplicación de 2 a 5 m. antes de la boquilla compensa las pulsaciones y aglutina el acelerante. Así se reduce significativamente el polvo. Los problemas debidos al vapor de agua cáustica y aerosoles se eliminan con la utilización de acelerantes alcalinos, estos son muy reactivos y deben por lo tanto adicionarse justo frente a la boquilla. El corto tiempo al lanzar hace que se reduzca mucho la cantidad de polvo.

La boquilla concentra el chorro y es responsable de la configuración del lanzado. Las boquillas de alta calidad están diseñados para dejar todo el material sobre el sustrato, sin pérdidas. Al mismo tiempo las partículas deben distribuirse de manera uniforme sobre el corte transversal del lanzado.

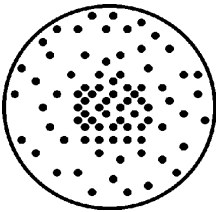


Figura 30 Pobre distribución del lanzado sobre el corte transversal

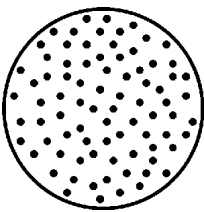


Figura 31 Buena distribución del lanzado sobre el corte transversal

5. Aplicando el concreto proyectado

La boquilla es la parte del equipo que sufre mayor desgaste en el proyectado. Se requieren boquillas de bajo desgaste para mejorar costos de aplicaciones cuando los volúmenes de lanzado son altos, como es el caso en la construcción de túneles. Los sistemas tradicionales son piezas de metal muy costosos, la boquilla en sí, es de plástico. Atendiendo la necesidad de una boquilla se desarrolló un sistema de menor costo y manejo amigable, que refleja el estado del arte actual.



Fig. 32. Boquilla actual.



Fig. 33. Boquilla tradicional

Debido a que la boquilla completa es una pieza única y totalmente de plástico, es más fácil de manejar. El moldeo en una sola pieza da gran flexibilidad a los diseños de la forma interior de la misma. El principio de la boquilla moderna permite el diseño de la forma del interior de tal manera que el chorro que pasa, está concentrado por lo que la pieza se desgasta uniformemente. La boquilla no está sometido a esfuerzos excesivos en un punto en particular por lo que no hay que desecharlo debido a falla del material en un punto específico. La capa se desgasta uniformemente, prolongando la vida de las boquillas y reduciendo así los costos por desgaste.

5. Aplicando el concreto proyectado

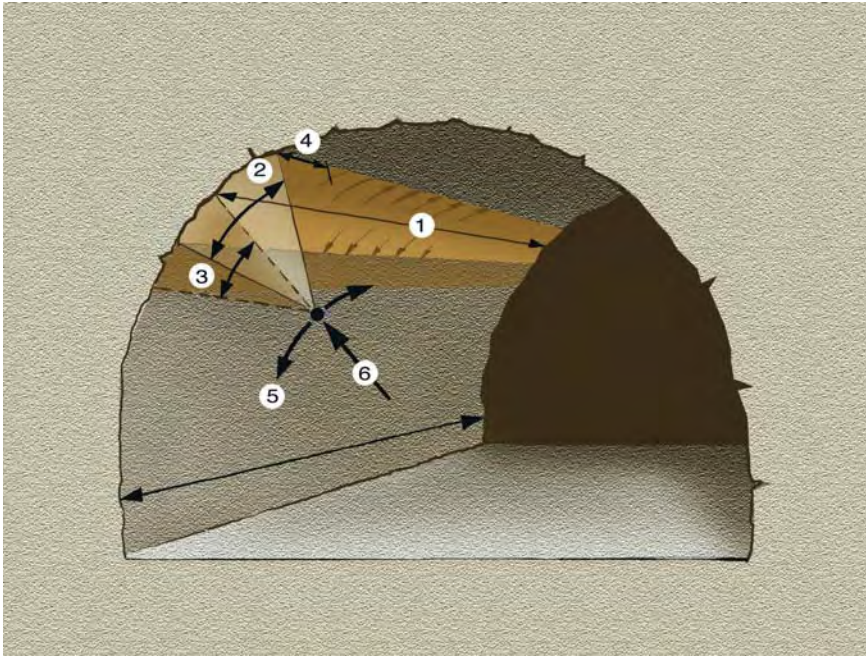


Fig. 34 Diagrama del manejo de la boquilla

Explicación del diagrama:

- 1) Movimiento telescópico del brazo: l = longitud del recorrido
- 2) / 4) Movimiento automático de la boquilla: 2) lanzamiento $\pm 15^\circ$ 2) / 4) = movimiento circular
- 3) Ángulo de erguimiento de la boquilla
- 4) Ángulo longitudinal de la boquilla
- 5) Contornos tangenciales de la superficie = meneo rotativo vertical u horizontal
- 6) Altura de alineación en el corte transversal

5. Aplicando el concreto proyectado

5.5. Evaluación de la Resistencia temprana

Se emplean tres métodos para medir el desarrollo de resistencia del concreto proyectado. Estos permiten que se evalúe el desarrollo de resistencia mecánica por medios prácticos.

| Etapas de desarrollo de resistencia | Método de Prueba | Rango de Aplicación |
|-------------------------------------|--|------------------------------|
| Resistencia muy temprana | Método de penetración con aguja | 0 a 1 N/mm ² |
| Resistencia temprana | Método de disparo de proyectil (broca) | ca. 1 a 15 N/mm ² |
| Resistencia | Resistencia a la compresión de una muestra cilíndrica. | Más de 10 N/mm ² |

Resistencia muy temprana

Este método mide la fuerza requerida para presionar una aguja con dimensiones definidas dentro del concreto proyectado. Se puede deducir la resistencia por la fuerza que opone. Es un método que se adecua para niveles de resistencia dados inmediatamente después de la aplicación de hasta 1 N/mm².

Desarrollo de resistencia inicial

Con este método (el método de disparo de proyectiles del Dr. Kusterle), se disparan puntillas estandarizadas en el concreto proyectado con una pistola Hilti DX 450L. Se puede obtener la resistencia a la compresión, determinando la profundidad de pene-



Fig. 35 Resistencia muy temprana de 0 a 1 N/mm² con el método de penetración con aguja.



Fig. 36 Resistencia muy temprana de 1 a 15 N/mm² con el método de proyectil.

5. Aplicando el concreto proyectado

tración y la fuerza para extraer la puntilla. Puede permitirse el cambio de la resistencia utilizando diferentes tipos de puntilla y munición. El Dr. G. Bracher ha simplificado éste método de manera que puede determinarse la resistencia a partir de la profundidad de penetración.

Desarrollo de Resistencia

Más allá de los 10 N/mm², la resistencia a la compresión puede obtenerse fallando núcleos directamente con una prensa hidráulica. Este método se emplea principalmente para verificar la resistencia final a los 28 días.



Fig. 37: Prueba de compresión de un núcleo.

5. Aplicando el concreto proyectado

5.6 Rebote

Uno de los desafíos más complejos en el lanzamiento del concreto proyectado es reducir la cantidad de material de rebote. Son tantos los factores que influyen en ello que es extremadamente difícil efectuar un control sistemático. Desde luego que el factor primordial, es el operador de la boquilla. La cantidad de material que rebota depende enormemente de la habilidad y experiencia del operador. Esto, claro está, es de vital importancia económica y logística, ya que por cada tonelada de material rebotado se duplica la cantidad de trabajo.

Los factores que influyen en la cantidad de rebote son:

- La experiencia y pericia del operador de la boquilla
- Dirección del lanzado (hacia abajo, hacia arriba u horizontalmente)
- Unidad de lanzado (presión del aire, boquilla, volumen lanzado)
- Proceso de lanzado (en seco/en húmedo)
- Diseño del concreto proyectado (agregado, gradación, acelerante, fibra, cementante)
- Concreto proyectado (resistencia muy temprana, adherencia, espesor de las capas)
- Condición del sustrato (uniformidad, adherencia)



Fig. 38: Evaluación del concreto proyectado para controlar el rebote.

5. Aplicando el concreto proyectado

El rebote cambia durante el proceso de lanzado. En los primeros minutos lo que rebota principalmente es el agregado debido a que es preciso hacer una capa de adherencia sobre el sustrato, luego, todo los componentes de la mezcla rebotan durante la operación de lanzado. Puede controlarse la cantidad de material rebotado efectivamente con la adherencia del concreto proyectado.

Calidad del Material Rebotado

Puede estimarse solamente grosso modo la cantidad de material de rebote si no hay mediciones separadas y bajo las condiciones que prevalezcan en el lugar:

- Para concreto proyectado en seco el rebote es de 20% a 30% en aplicaciones verticales hacia arriba.
- Para concreto proyectado vía húmeda el rebote es de 5 a 15% en aplicaciones verticales hacia arriba.

Reutilización/desecho

En principio, el material rebotado de concreto proyectado es concreto reciclable con todos los componentes de la mezcla original. Sin embargo, puede estar contaminado (poluto) por las condiciones reinantes en el medio. De la misma manera que con el concreto estructural, una pequeña proporción puede reutilizarse sin ningún problema máximo de un 10% a un 20% del material rebotado en el proceso de lanzado, siempre y cuando sea correctamente tratado.

5.7 Generación de Polvo

Cualquier tipo de aplicación de concreto proyectado genera polvo. Sin embargo, difieren en mucho, los tipos y cantidades de polvo generado. Es un problema importante del concreto proyectado vía seca porque los componentes tienen una tendencia natural a generar polvo. La cantidad de polvo que se produce puede reducirse mediante prácticas adecuadas. Entre las medidas para reducir cantidades de polvo emitido en el lanzado del concreto proyectado en seco, están:

- Utilización de agregados ligeramente húmedos (en vez de secados al aire)
- Sellamiento del sistema de transporte
- Parámetro de a boquilla correctamente ajustados y coordinados (sincronización), (minimización del aire), agua, acelerante (minimizados).
- Utilización de acelerantes de fraguado libres de álcalis

5. Aplicando el concreto proyectado

- Empleo de brazos de lanzado para volúmenes de salida superiores a $6\text{m}^3/\text{h}$
- Aditivos de concreto proyectado para fijar el polvo.

A pesar de todas esas medidas precautelativas, en el lanzado de concreto proyectado en seco se produce de dos a tres veces más de polvo que en lanzado en húmedo. Para mejorar la seguridad un poco más, deben emplearse únicamente acelerantes libres de álcalis.

5.8 Sombras en el Lanzado

En las reparaciones de concretos y morteros proyectados, los vacíos en el material aplicado, tales como los que se encuentran detrás del refuerzo constituyen un problema importante y se han convertido también en un desafío en la construcción con este material. Un lanzador bien experimentado podría llegar a reducir las sombras del lanzado escogiendo una secuencia apropiada. Es pues esencial tener como criterio principal para una alta calidad del concreto proyectado, la experiencia y pericia del lanzador.

5.9 Mecanización / automatización

Cualquier paso u operación de repetición constante demanda cada vez mejor automatización. Hace unos 100 años, el mortero de rápido fraguado **Sika-1** se aplicaba a mano entre las juntas de las paredes de mapostería en piedra bruta por innumerables trabajadores de los túneles, mientras que hoy día pueden aplicarse rápidamente a escala industrial, enormes cantidades de concreto proyectado y mortero de alta calidad, mejorados con aditivos, con unos cuantos especialistas empleando máquinas y sistemas de concreto proyectado de alto rendimiento. Se ha avanzado mucho en la tecnología de concreto proyectado y ésta abarca casi todas las operaciones relacionadas con éste; desde la producción hasta la aplicación. El futuro de las operaciones en años venideros, está orientado al desarrollo de mayor automatización, especialmente para facilitar la carga del operador de la boquilla. El propósito es enfocar la experiencia del operador en el concreto proyectado y relevarlo de las múltiples secuencias mecánicas que pueden automatizarse. Solo pueden ser adecuados para construcción de túneles, esos desarrollos nuevos que posean diseños robustos y extremadamente fuertes así como formas tan simples como sea posible; de otra manera no tendrán oportunidad de sobrevivir.

6. Proceso de Lanzado

El proceso de lanzado define el acarreo del concreto o mortero proyectado desde que es transportado del vehículo que lo suministro hasta la boquilla y lanzado. Ya se ha visto que hay diferencia entre el concreto proyectado en seco y en húmedo, esta diferencia también aplica para los procesos, porque estos deben transportarse y lanzarse de modo distinto debido a las propiedades del material.

| Tipo de Concreto Proyectado | Método de suministro | Boquilla |
|--|----------------------|---|
| Concreto proyectado vía seca Mortero proyectado vía seca Gunitas | Flujo diluido | A adicionar en la boquilla inmediatamente antes: Agua Acelerante de fraguado |
| Concreto proyectado vía húmeda Mortero proyectado vía húmeda | Flujo denso | A adicionar en boquilla o inmediatamente antes: Aire comprimido Acelerante de fraguado |
| | Flujo diluido | A adicionar en la boquilla o inmediatamente antes: Aire comprimido Acelerante de fraguado |

Resumen de procesos de concreto proyectado.

Los dos procesos tienen ventajas específicas, lo que resulta en sus usos respectivos. Las características de estos sistemas se comparan en términos generales en la tabla que sigue:

| | En seco | En Húmedo |
|--|---------|--|
| Formación de polvo | Alto | Bajo |
| Rebote | Alto | Bajo |
| Rendimiento | Bajo | Alto |
| Costos de equipo | Bajo | Alto |
| Bajos Rendimientos ↓ Secciones transversales – menores | | Altos rendimientos ↓ Secciones transversales – mayores |

Criterios principales al seleccionar la técnica de lanzado.

6. Proceso de Lanzado

6.1. Proceso de Lanzado vía Húmeda

El suministro por flujo denso es estándar y muy común para el concreto proyectado húmedo, pero este material puede suministrarse también mediante flujo diluido empleando máquinas adecuadas. El llamado concreto bombeable en flujo denso, se suministra mediante:

- Bombas duplex
- Bombas helicoidales
- Bombas de prensa (bomba de rotor)

Para concreto proyectado flujo denso el método de suministro más común es el que se hace con bomba duplex. Se carga el material en la bomba desde una tolva alimentadora y se pasa a través de mangueras y tubos. La diferencia principal con respecto al concreto bombeado tradicionalmente estriba en que el requerimiento para la pulsación

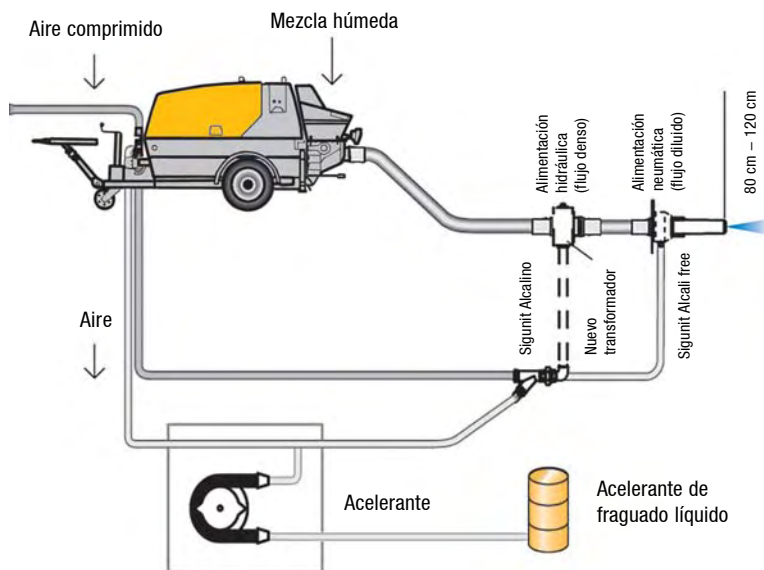


Fig. 39 Concreto proyectado vía húmeda, flujo denso.

6. Proceso de Lanzado

debe ser lo más baja posible a fin de conseguir un lanzado constante en la boquilla. Para alcanzar esto se usan varias maneras de mejorar la tasa de alimentación y reducir las interrupciones.

El aire comprimido se incorpora en la boquilla, desde el compresor de aire mediante mangueras separadas. El dosificador incorpora el acelerante en la boquilla, también mediante mangueras separadas. Se sincroniza la dosificación con la cantidad de concreto de manera que la cantidad presente de acelerante de fraguado se mantenga constante.

Se necesitan máquinas de rotor de diseño especial para la suministro de concreto proyectado vía húmeda mediante de flujo diluido.

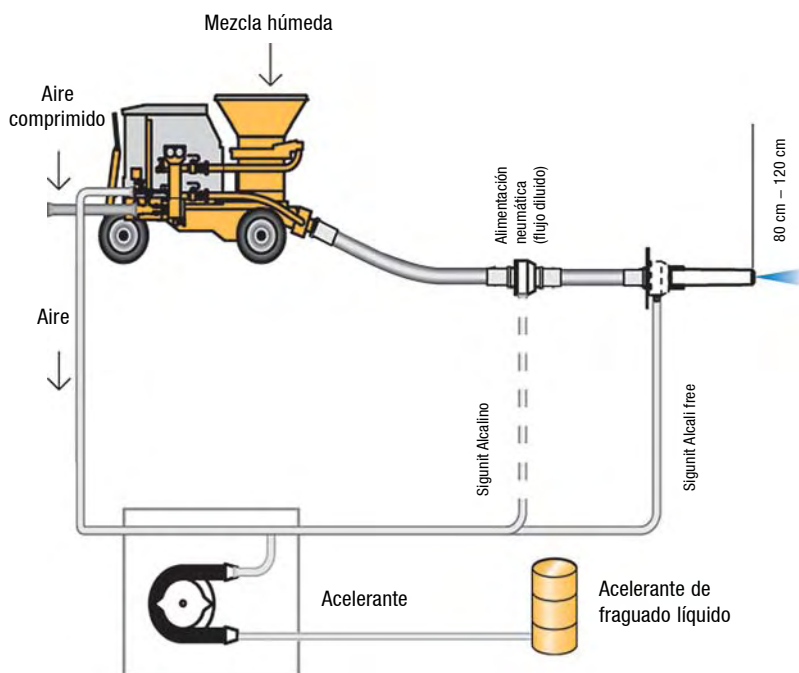


Fig. 40. Concreto proyectado vía húmeda flujo diluido.

6. Proceso de Lanzado

6.1.1. Ventajas

Las ventajas del concreto proyectado vía húmeda son muchas y muy variadas. El lanzado vía húmeda es el método más moderno y eficiente para colocar concreto proyectado.

- Rendimiento mayor hasta de 25m³/h en algunos casos
- Cantidad reducida de material de rebote un factor de 2 a 4
- Notoria mejoría de las condiciones de trabajo por la menor generación de polvo
- Menores costos de desgaste para el equipo de lanzado
- Menor consumo de aire comprimido al lanzar con flujo denso
- Mejor calidad del concreto proyectado (contenido constante de agua)

El concreto proyectado vía húmeda flujo denso demanda más trabajo al principio (arranque) y al final (limpieza) del lanzado que en el proceso en seco. Además, el tiempo de trabajo se prefija durante la producción y por tanto el concreto proyectado debe aplicarse dentro de ese tiempo, si no, se desperdiciará el concreto.

Los usos ideales para el concreto proyectado vía húmeda se basan en las ventajas del proceso:

- Rendimientos entre altos y muy altos
- Especificaciones mecánicas del concreto endurecido entre altas y muy altas
- Requerimiento de durabilidad altos

6. Proceso de Lanzado

6.1.2. Equipos

En el lanzado de concreto proyectado en húmedo, se emplean métodos manuales y mecánicos, pero tradicionalmente se aplica con máquina. Los grande volúmenes y las enormes secciones transversales que se elaboran, requieren que el trabajo sea mecanizado. Cuando se trabaja con mezclas húmedas, se usan principalmente sistemas de concreto proyectado con bombas duplex. A diferencia de las bombas de concreto tradicionales, estos sistemas deben satisfacer el requerimiento adicional de mantener el flujo de concreto de manera tan constante como sea posible, y por lo tanto continuo, a fin de garantizar una aplicación homogénea del lanzado.

Descripción funcional de PUTZMEISTER, bombas de doble pistón

Las bombas de concreto operan hidráulicamente con motores diesel o eléctricos y bombas de aceite. Los émbolos de suministro están vinculados hidráulicamente a través de cilindros comunicantes. Estos operan mediante halado–empuje. El émbolo en reversa genera un vacío que se equilibra con el material que fluye dentro del cilindro al mismo tiempo, el embolo de avance, empuja el material (concreto proyectado) dentro de las mangueras. Al final de la bomba que retrocede, el interruptor pivotea y los émbolos cambian su dirección de movimiento.

El alma de una bomba consiste en un cilindro comunicante, un cilindro de alimentación con émbolo de repartición, tanque de agua entre los dos, tolva de concreto con agitador, tubería de intercambio, palanca y cilindro de reversión para la tubería de intercambio.

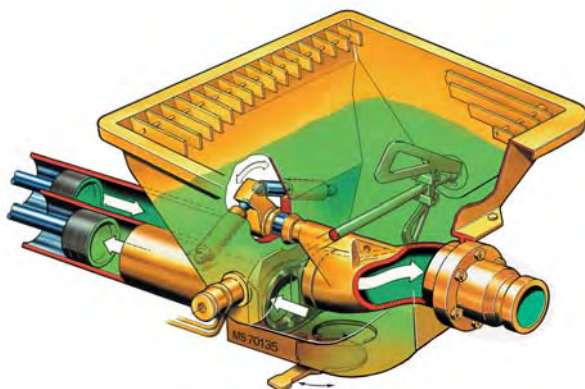


Fig. 41 Bomba Putzmeister de doble pistón

6. Proceso de Lanzado



Fig.42 Putzmeister
Bomba estacionaria de
concreto Sika®-PM702 E



Fig.43 Multi Putzmeister
Bomba estacionaria de
concreto BSA 1002 D



Fig.44 Sika® - PM500

6. Proceso de Lanzado

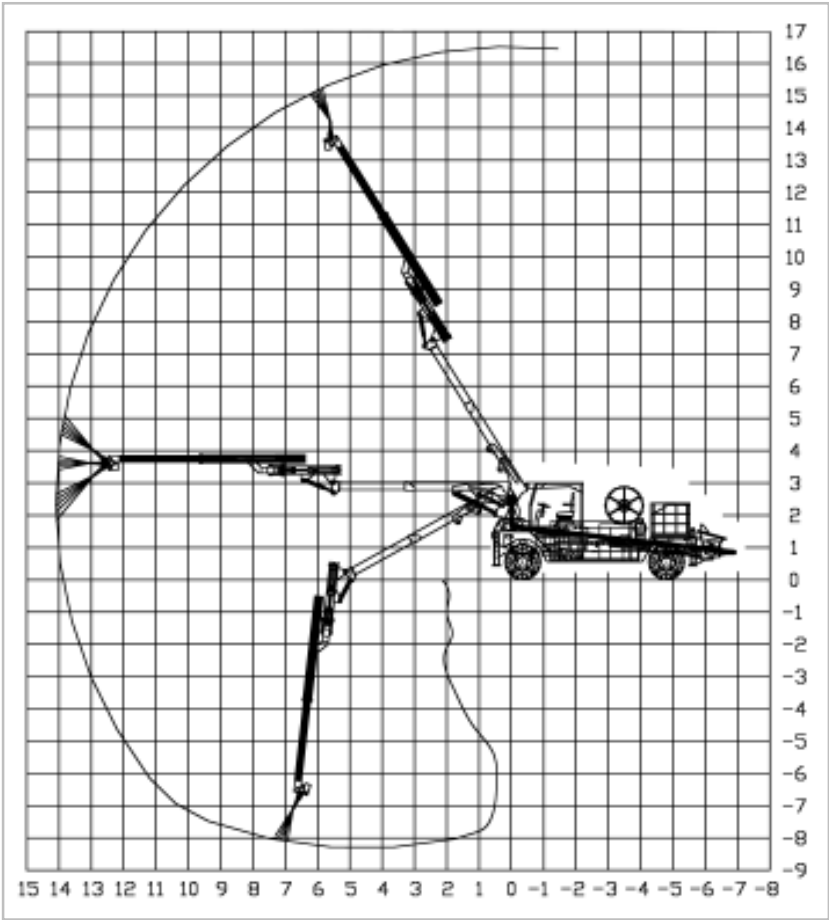


Fig.45 Diagrama de rango Sika®-PM 500

6. Proceso de Lanzado

De igual forma que en los métodos de aplicación de concreto proyectado, el proceso de construcción de túneles se ha ido mecanizando y automatizando. Las máquinas de perforación de túneles (TBM) llevan la delantera. También se utiliza el concreto proyectado cuando se usan TBM si las condiciones del sustrato, el recubrimiento y el método de estabilización lo permiten. Los sistemas de concreto proyectado deben adaptarse a las condiciones y requerimientos. Estos se montan directamente sobre los equipos de perforación de túneles y por lo tanto son parte integral del sistema mecanizado de construcción de túneles conjuntamente con sus limitaciones y potencialidades.



Fig. 46/47 Aliva®-303 L2 sobre la máquina perforadora de túneles operada por la alianza (joint venture) el TAT Túnel de cota baja Bodio Gothard

6. Proceso de Lanzado

6.1.3. Unidades de Dosificación

Los dosificadores se usan para adicionar el acelerante. Para garantizar una estabilidad del fraguado del concreto proyectado, la cantidad dosificada debe correlacionarse con la cantidad del concreto; en otras palabras, el dosificador debe estar sincronizado con el suministro de concreto. El dosificador debe también cubrir el rango completo de dosificación de los productos utilizados. (Dosis mínima y máxima multiplicadas por el contenido de cemento en la cantidad de concreto proyectado suministrado.)

Descripción funcional de Aliva, dosificadores para acelerantes de fraguado

El acelerador líquido de fraguado se incorpora dentro de la bomba a través de una manguera. Esta manguera es comprimida por dos rodamientos en un rotor y el contenido de la manguera es transportado mediante la revolución del rotor. A la salida de la bomba se agrega el aditivo dentro de la válvula y se mezcla con agua o aire (si se requiere). Un interruptor de presión integral impide que la bomba y los tubos se sobrecarguen si ocurriera un bloqueo en la línea del sistema.

Para aplicaciones menores pueden agregarse acelerantes en polvo manualmente, pero esto no es una medida controlada y no es factible en el caso de grandes aplicaciones.

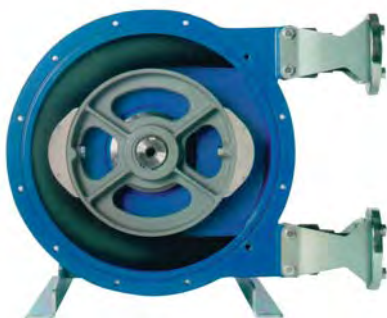


Fig. 48. Esquema de la sección transversal de una dosificadora



Fig.49: Aliva® – 403 Extendida

6. Proceso de Lanzado

6.2 Lanzado vía Seca

En el concreto proyectado vía seca se hace el transporte mediante procesos de flujo diluido. El concreto proyectado se transporta usando aire comprimido.

- Maquinas de rotor
- Máquinas de cámara de compresión
- Máquinas helicoidales

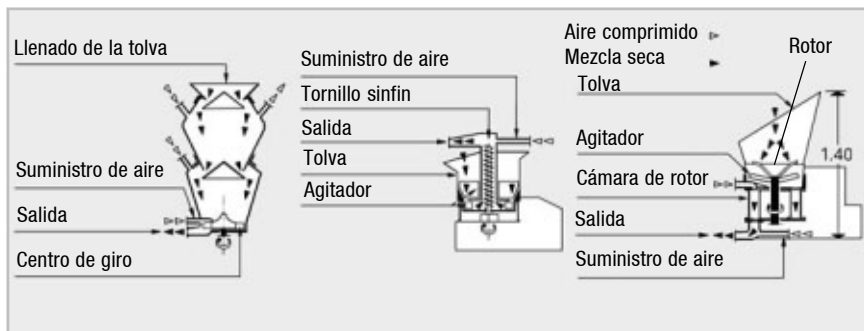


Fig. 50. Principios de operación de las máquina de tipo dos cámaras, tipo tornillo y la tipo rotor.

El suministro mediante máquinas tipo rotor es el método más frecuente de transporte para el concreto proyectado con flujo diluido. El material pasa a través de una tolva alimentadora dentro de las cámaras cilíndricas de una estructura similar al cilindro de un revolver. El material en seco se sopla en porciones mediante aire comprimido y se transporta a alta velocidad a través de manguera y tubos.

El acelerante de fraguado es incorporado por el dosificador mediante mangueras separadas hasta la boquilla. La dosificación se sincroniza con la cantidad de concreto de manera tal que la cantidad establecida de acelerante de fraguado se agregue invariablemente. En el proceso de lanzado vía seca pueden reemplazarse los acelerantes con cementos rápidos especiales que fraguan en muy corto tiempo tras ser humedecidos con agua.

6. Proceso de Lanzado

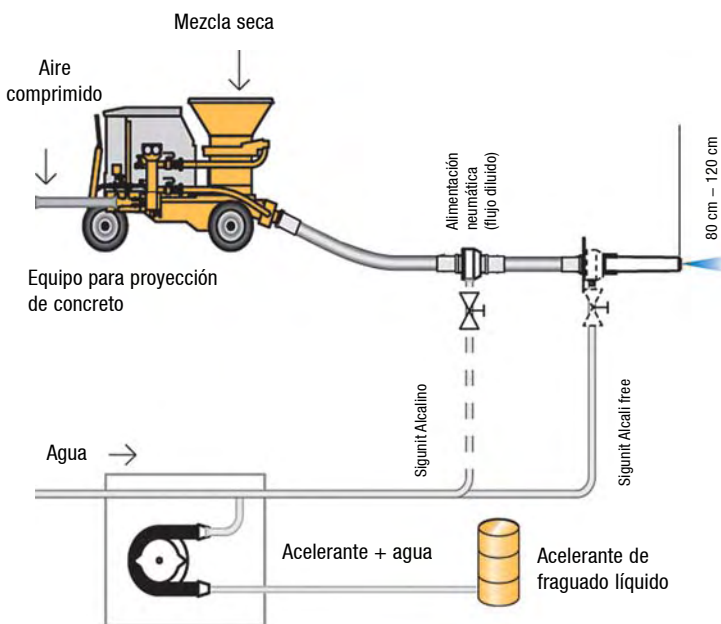


Fig.51: Concreto proyectado vía seca flujo diluido

6.2.1. Ventajas

La ventaja del concreto proyectado vía seca están en su flexibilidad. Es el método tradicional de aplicación de concreto proyectado mejor conocido en el mundo.

- Máxima resistencia a muy temprana edad para soporte preliminar o estabilización
- Tiempo de almacenamiento en silo casi ilimitado (disponibilidad)
- Cero desperdicio de concreto

Con el concreto proyectado vía seca, se afecta la parte económica debido a las grandes cantidades de material que rebote, a la generación de polvo y a los altos costos de las piezas de desgaste.

6. Proceso de Lanzado

De las ventajas del proceso resultan las aplicaciones ideales para el concreto proyectado vía seca y las gunitas listas premezcladas:

- Reparaciones del concreto
- Sello preliminar cuando se presentan altos caudales de agua
- Trabajos menores de lanzado
- Concepto logístico no–dependiente del tiempo (almacenamiento in situ)

6.2.2. Equipos

El proceso de lanzado vía seca puede hacerse de manera mecánica o manual. Debido a que, puede utilizarse concreto proyectado vía seca para bajos volúmenes de lanzado, la aplicación manual es mucho más importante que en el caso del concreto proyectado vía húmedo. Como se describió, se aplican mezclas secas con maquinas a rotor, que difieren en:

- Rendimiento (m^3/h)
- Usos (en seco/en húmedo/ambos)
- Fuerza de propulsión (neumática/eléctrica)
- Tamaño de la unidad de lanzado (dimensiones/peso/conveniencia)
- Control (manual/parcialmente automatizado)
- Operación (en la unidad/control remoto)
- Instalaciones adicionales (dosificadores/equipo de limpieza)

La máquinas de rotor son robustas en cuanto a diseño y tiene una larga tradición, pero aún hay mucho para desarrollar, concentrándose en las siguientes áreas:

- Mejorando la resistencia de las partes que se desgastan
- Mejorando la protección contra polvo
- Logrando mayor eficiencia en el llenado de las cámaras
- Aumentando el volumen de lanzado para algunas aplicaciones

6. Proceso de Lanzado

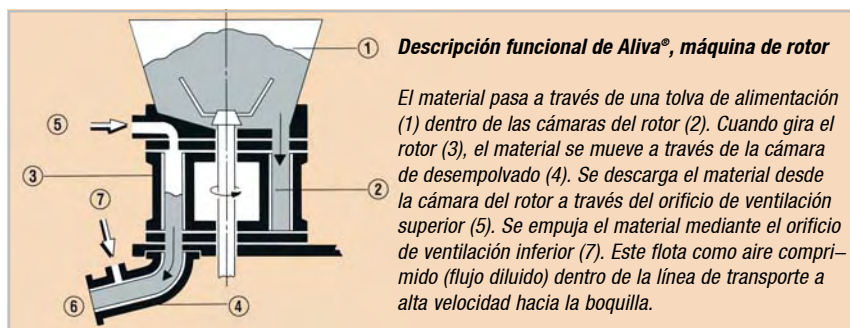


Fig.52: Sección transversal de una máquina de rotor Aliva®



Fig.53 Aliva®-263 Extendida por el dosificador



Fig.54 Aliva®-246.5 Básica

7. Rango de Productos Sika Putzmeister

Sistemas de Lanzado de Concreto

Sika®-PM500 P

Sika®-PM500 PC

Sistemas de concreto proyectado con bomba **BSA 1005** para concreto proyectado vía húmeda.

Sika®-PM500 R

Sika®-PM500 RC

Sistema de concreto proyectado con rotor **Aliva®-285** para concreto proyectado vía seca y vía húmeda.

Sika®-PM407 R

Sistema de concreto proyectado con rotor **Aliva®-285** para concreto proyectado vía seca y vía húmeda.

Sika®-PM407 P

Sistemas de concreto proyectado con bomba **BSA 702** para concreto proyectado vía húmeda.

Máquinas para concreto proyectado

Maquinas de rotor para concreto proyectado

Aliva®-246

Aliva®-252

Maquinas de rotor para concreto proyectado vía seca y vía húmeda.

Aliva®-263

Aliva®-285

Aditivos para concreto proyectado

Sika®ViscoCrete®

SikaTard®

Sigunit®

Sikament®

SikaFume®

SikaCrete®

SikaPump®

Sika Stabilizer®

Otros productos para construcción con concreto proyectado

FlexoDrain®

8. Índice

| Termino | Página | Termino | Página |
|--|---------------|---|---------------|
| Acelerantes de fraguado | 20 | Curvas de gradación del concreto | |
| Acelerantes de Fraguado libres de álcali | 23 | proyectado vía húmeda | 19 |
| Adherencia | 28 | Desarrollo de resistencias | 28 |
| Adiciones | 17 | Diagrama de rangos | 60 |
| Aditivos de concreto proyectado | 21 | Dirección del proyectado | 46 |
| Agregado | 19 | Distancia del proyectado | 46 |
| Agregado ligeramente humedecido | 53 | Dosificación de acelerantes de fraguado | 64 |
| Aire Comprimido | 57,65 | Dosificación manual | 64 |
| Alcalino | 23 | Durabilidad | 33 |
| Alimentación | 48,54 | Efectos de las adiciones | 17 |
| Angulo de proyección | 36 | Endurecimiento | 21 |
| Aplicación | 44 | Equipo protector | 44 |
| Aplicación de adiciones | 17 | Equipo protector personalizado | 44 |
| Arena | 19 | Escoria | 17 |
| Arranque | 36 | Estabilización con concreto proyectado | 12 |
| Aseguramiento de la calidad | 40 | Estabilización de la excavación | 12 |
| Automatización | 55 | Estabilizadores de consistencia | 21 |
| Bomba | 57 | Estabilizadores de largo plazo | 26 |
| Bomba de Concreto | 60 | Estabilizadores de mezcla | 24 |
| Bombas de pistón | 57 | Excavación completa | 12 |
| Bombas duplex | 57 | Excavación Parcial | 12 |
| Bombas helicoidales | 57 | Fibra de acero | 30 |
| Boquillas | 48 | Fibra de Refuerzo | 30 |
| Boquillas de proyectado | 48 | Fibras de polipropileno | 30 |
| Canales de drenaje | 45 | Formula del concreto proyectado | |
| Cantidad de rebote | 36,51,58 | vía húmeda | 37 |
| Características del sistema | 56 | Formulación | 37,42 |
| Cáustico | 23 | Formulación del concreto proyectado | 37,42 |
| Cavidades | 54 | Formulaciones del concreto proyectado | |
| Ceniza volante | 18 | vía seca | 42 |
| Comportamiento post fractura | 30 | Generación de Polvo | 43 |
| Compresor | 57,65 | Gradación de los Agregados | 37,42 |
| Concreto de desperdicio | 41 | Grava | 19 |
| Concreto proyectado – construcción | 7,10 | Gunita | 41 |
| Concreto proyectado de alto desempeño | 33 | Gunita premezclada | 41 |
| Concreto proyectado vía húmeda | 36,57 | Hilti | 51 |
| Concreto proyectado vía seca | 41,65 | Humedad de Agregados | 43 |
| Configuración de la boquilla | 48 | Humedad inherente del agregado | 43 |
| Contenido de agua | 24,33 | Limpieza | 36 |
| Contenido de finos | 16 | Llenante | 19 |
| Curado | 33 | Maquina de perforación de túneles | 60 |
| Curva de gradación de concreto | | Máquinas de cámara de comprensión | 65 |
| proyectado vía seca | 19,42 | Máquinas de proyección de concreto | 67 |

8. Índice

| Termino | Página | Termino | Página |
|---|---------------|--|---------------|
| Maquinas de rotor | 65 | Reparaciones | 41 |
| Máquinas helicoidales | 65 | Reparaciones | 66 |
| Máquinas para concreto proyectado | 67 | Reparaciones de concreto | 66 |
| Materiales | 16 | Requerimientos de Aire | 36,59 |
| Materiales de concreto proyectado | 7,16 | Resistencia | 28 |
| Mecanización | 55 | Resistencia a la compresión de núcleos | 51 |
| Medio Ambiente | 44 | Resistencia a los sulfatos | 33 |
| Método de disparo de perno | 51 | Resistencia AKR | 34 |
| Método de penetración con aguja | 51 | Resistencia al fuego | 32 |
| Métodos de refuerzo | 30 | Resistencia al hielo | 33 |
| Mezclas de agua | 20 | Resistencia al impacto | 30 |
| Microsilica | 17 | Resistencia final | 29 |
| Morteros secos listos para proyectado | 41 | Resistencia temprana | 28 |
| Muestras de cubos | 29 | Resistencias muy tempranas | 28 |
| Núcleos | 29 | Retardantes de fraguado | 21 |
| Páneles de prueba | 29 | Retracción temprana | 30 |
| Partes que se desgastan | 67 | Revestimiento con concreto proyectado | 14 |
| Película lubricante | 16 | Revestimiento final | 14 |
| Penetración con aguja | 51 | Seguridad | 21,44 |
| Polvo | 54 | Sello preliminar | 41,66 |
| Presión de bombeo | 27 | Sincronización | 57,65 |
| Proceso de concreto proyectado vía seca | 65 | Sistema de tres materiales | 16 |
| Proceso de disparo de perno | 51 | Sistema para concreto proyectado | 60 |
| Proceso de proyectado | 56 | Sistemas de proyección de concreto | 60 |
| Proceso en flujo denso | 57 | Sombras de proyectado | 54 |
| Proceso por flujo diluido | 57,65 | Suministro | 44 |
| Procesos de proyección de concreto | 7,56 | Suministro en flujo denso | 57 |
| Productos Putzmeister | 69 | Suministro por flujo diluido | 57,65 |
| Productos Sika | 69 | Superficie de contacto | 45 |
| Proyectado capa por capa | 46 | Superplastificante | 24 |
| Proyectado vía húmeda | 57 | Sustrato | 45 |
| Pruebas de placa | 31 | Sustrato de concreto proyectado | 45 |
| Rebote | 51 | Tiempo de manejabilidad | 21 |
| Refuerzo | 30 | Transferencia | 56 |
| Rehabilitación | 66 | Transferencia | 44 |
| Relación a/c | 24,33 | Transporte | 44 |
| Rendimiento del proyectado | 36,58 | Unidad de metraje | 58 |