

Hormigón Proyectado

Dosificación, Fabricación y Puesta en Obra

Por D. Alberto Rey
Departamento de Constructoras y Grandes Obras de SIKA, S.A.

RESUMEN: La utilización generalizada del hormigón proyectado, como elemento fundamental, tanto en el sostenimiento como en el revestimiento de túneles y obras subterráneas, ha motivado un continuo desarrollo tecnológico, tanto en los materiales componentes del hormigón (cemento, áridos y aditivos) y en la maquinaria, como en su aplicación y control de calidad. El presente artículo pretende facilitar las nociones básicas sobre su dosificación, fabricación y puesta en obra, además de presentar los últimos avances tecnológicos, referentes a aditivos, maquinaria y sistemas de aplicación, relacionados con esta herramienta, tan indispensable en el campo de los túneles y las obras subterráneas.



HORMIGÓN PROYECTADO

1.- Definiciones

El hormigón proyectado es actualmente, un elemento indispensable en los procedimientos de sostenimiento y revestimiento estructural de túneles y taludes.

Es importante aclarar algunas definiciones:

Se entiende por **gunitar** la puesta en obra de un hormigón o mortero proyectado con aire a presión a través de manguera, a gran velocidad sobre un soporte.

El **hormigón proyectado** es un hormigón cuyo tamaño máximo de áridos es superior a 8 mm, y que aplicado a máquina, se proyecta a gran velocidad sobre un soporte a través de manguera y boquilla.

El **mortero proyectado** es un mortero cuyo tamaño máximo de áridos no excederá 8 mm,

y que aplicado a máquina, se proyecta a gran velocidad sobre una superficie a través de una manguera y boquilla.

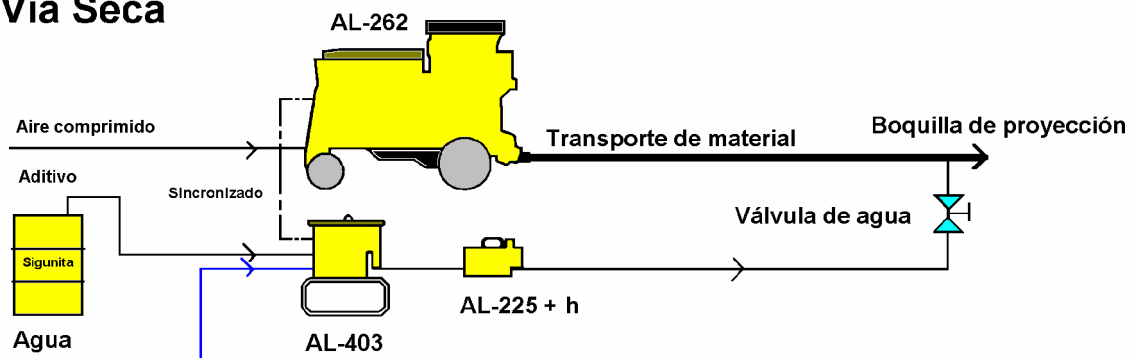
En la actualidad se usan tres procesos distintos, que son: **Mezcla seca**, **mezcla húmeda** y **mezcla semi-húmeda**. El proceso de mezcla húmeda conlleva el empleo de más servicios, pero su uso está generalizado para grandes aplicaciones.

El sistema de mezcla semi-húmeda, que consiste en la dosificación del agua, aproximadamente 5 m antes de la boquilla, es un proceso que evita fundamentalmente que la mezcla seca se disperse (especialmente el cemento) a la hora de hacer la proyección.

Cuando se confecciona un proyecto en el cual se especifica una Resistencia a Compresión Simple de un hormigón proyectado, se suelen definir las Resistencias a 24 horas, 7 días, y 28 días, para cumplir las necesidades de sostenimiento. Estas resistencias dependen de: Áridos, cementos, personal especialista, maquinaria, medios auxiliares, aditivos (acelerantes, estabilizadores, superplastificantes, etc.), y adiciones.

Sistema de mezcla seca. El sistema de mezcla seca consta de una serie de fases, y requiere unos equipos especializados.

Vía Seca



Es un procedimiento mediante el cual todos los componentes del hormigón se mezclan previamente, excepto el agua, que se añade en la boquilla antes de la proyección de la mezcla, transportándose la mezcla en seco a través de mangueras de forma neumática hasta la boquilla.

1º El cemento y los áridos se mezclan adecuadamente hasta conseguir una perfecta homogeneidad en proporciones variables. Lo normal es usar cemento Portland, sin embargo, a menudo se emplean cementos especiales, junto con diferentes clases de áridos (artificiales o naturales, de río o machaqueo).

2º La mezcla de cemento/áridos se introduce en un alimentador del equipo (junto con acelerante en polvo si se emplea).

3º La mezcla entra en la manguera mediante una rueda o distribuidor (rotor).

4º La mezcla es transportada mediante aire a presión (flujo diluido) hasta una boquilla o pistola especial. Esta boquilla va equipada con un distribuidor múltiple perforado, a través del cual, se pulveriza agua a presión (junto con acelerante líquido si se emplea), que se mezcla con el conjunto cemento/áridos.

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

El uso de las máquinas de mezcla seca puede dividirse en tres grandes categorías: Para gunitados de *alta velocidad*, gunitados de *baja velocidad* y de *transporte*.

El gunitado de *alta velocidad* se consigue empleando una boquilla pequeña y una alta presión de aire, de lo que resultan una alta velocidad en la boquilla y una gran velocidad de impacto, con velocidades de partículas de 90 a 120 metros por segundo. Esta gunita posee una compactación extraordinaria. El índice de colocación (rendimiento) de un gunitado a alta velocidad resulta bajo. Su uso, debido al tamaño de las boquillas, se establece exclusivamente para morteros.

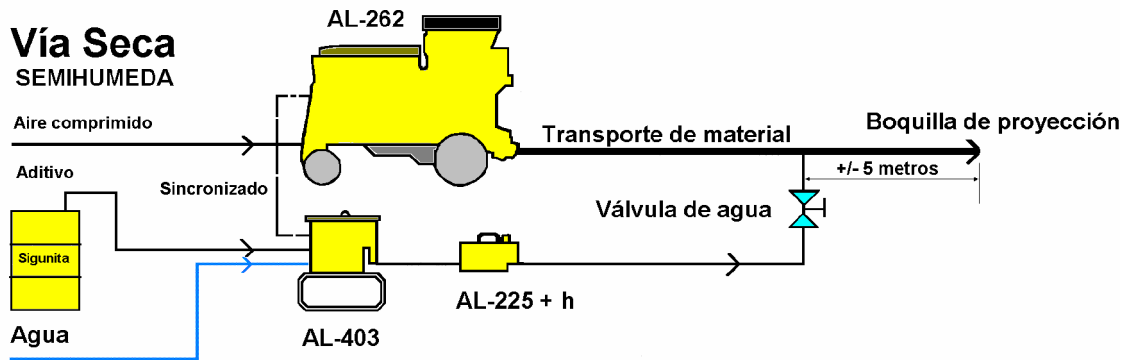
El gunitado de *baja velocidad* se consigue empleando una máquina de gran producción y una manguera de diámetro superior con una boquilla amplia, a menudo de paso directo. La gunita que se obtiene con la técnica de baja velocidad, no se compacta quizás tan bien como la de alta velocidad, pero posee todas las propiedades típicas de una gunita, como son: Baja relación A/C, buena compactación "in situ", alto contenido de cemento, etc.

El tipo de máquina empleado en la práctica, depende del tipo de gunita que se requiera, pero casi todas las máquinas permiten que se adapte en alguna medida su producción. Las propiedades de la gunita pueden modificarse cambiando la salida acoplada, el tamaño de la manguera o el diámetro de la boquilla o pistola.

La diferencia fundamental en las máquinas para *transporte*, radica en el rotor, que es de huecos más anchos, y que su finalidad es transportar la mezcla en seco hasta la distancia conveniente (como máximo 100 m en horizontal). Estos sistemas se utilizan como estaciones intermedias, o bien para elevar a alturas suficientes las mezclas secas para posteriormente trabajar con ellas. En estos casos, las boquillas o pistolas tienen determinados mecanismos que reducen el aire de la proyección por medio de unos frenos metálicos, que al permitir escapar el aire, dejan caer la mezcla en el sitio preparado.

Sistema de mezcla semi-húmeda. Este sistema idéntico en sus primeras fases al de la mezcla seca, únicamente difiere de él en que, a una distancia aproximadamente de 5 m de la boquilla, se efectúa la adición de agua, y se puede, y debe, humedecer los áridos, hasta un 10 %, por lo que se mejoran las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla, de la que saldrá el mortero u hormigón proyectado.

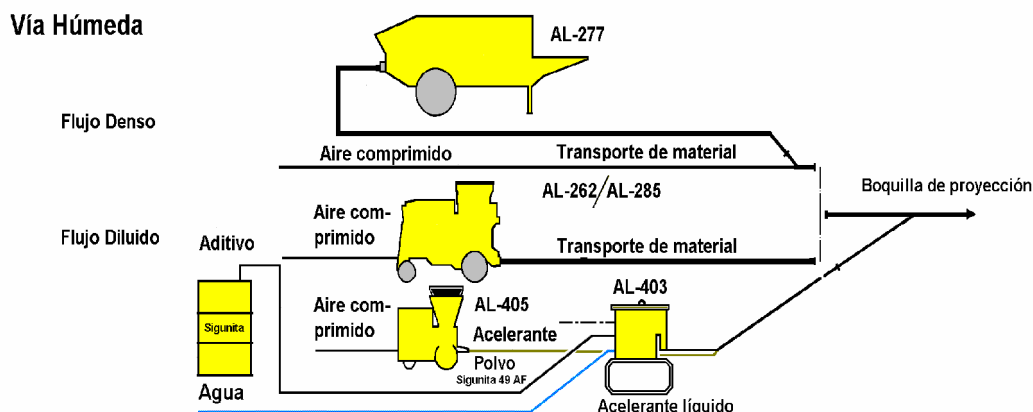
Otra de las ventajas de este sistema, es que evita el polvo resultante de la proyección, así como la pérdida de cemento en la mezcla al salir de la boquilla. También se puede considerar que el agua añadida se incorpora perfectamente durante esos 5 m a la mezcla, haciéndola más homogénea, y lo que es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



Sistema de mezcla húmeda. La gunita posee propiedades específicas que se manifiestan especialmente a través de la naturaleza del método de colocación. La gunita de mezcla húmeda consigue morteros y hormigones de propiedades equivalentes a la mezcla seca con técnicas de dosificación y aditivos, pero se consigue una disminución importante de la dispersión de resultados, causa y preocupación del control de aplicación.

Las máquinas de mezcla húmeda producen mortero u hormigón proyectado, por dos procedimientos fundamentales en Flujo diluido y Flujo denso, (Rotor y Bomba), con grandes rendimientos, cubriendo de este modo sobradamente las aplicaciones de las máquinas de mezcla seca.

Estas máquinas se limitan a un bombeo a alta velocidad a través de conductos rígidos y flexibles hasta una boquilla, provista de un chorro de aire comprimido, con lo que se obtiene un mortero u hormigón de compactación relativa. No obstante, debe añadirse haciendo honor a la verdad, que los recientes progresos, tanto de nuevas máquinas como de aditivos estabilizadores, han conducido esta tecnología a un sistema perfectamente compatible con el fin deseado y con una ventaja importante: La no-formación de polvo y el mantenimiento de la relación Agua/Cemento.



2.- Materiales

La calidad de los materiales a utilizar, los áridos y sus granulometrías, el cemento y su

dosificación, el lugar, las condiciones de trabajo, y el equipo empleado, influyen en la calidad de la gunita. Se deberán realizar ensayos previos, tanto del funcionamiento de los equipos, como de los materiales a emplear.

2.1.- Áridos

Los áridos a emplear en el hormigón proyectado se obtendrán por la selección y clasificación de materiales naturales o de machaqueo, o por una mezcla de ambos. Las arenas más finas favorecen la retracción mientras que las más gruesas incrementan el porcentaje de rebote. Los áridos estarán compuestos de partículas limpias, duras, resistentes, con una calidad uniforme. El empleo de áridos finos o gruesos, o una mezcla de ambos, se hará de acuerdo con el espesor a aplicar en el hormigón proyectado. En general, no se utilizan áridos con tamaños > 15 mm.

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

Se define como árido grueso, la fracción de árido mineral de la que queda retenida en el tamiz nº 4 ASTM un mínimo del 70% en peso. Los áridos gruesos podrán ser rodados o de machaqueo.

Las curvas granulométricas más empleadas en el mortero u hormigón proyectado son: 0-8, 0-12, y 0-15, incluidas en la Norma UNE 83607.

2.2.- Cementos

Los cementos a emplear en el hormigón proyectado serán preferentemente del tipo CEM I, categorías 52,5 R ó 42,5 R. En el caso de que las condiciones locales lo aconsejaren, se podrán utilizar otros cementos, previamente aprobados y ensayados. Si la gunita va a ser expuesta a la acción de suelos o aguas subterráneas con alta concentración de sulfatos, deberá emplearse cemento sulforresistente.

2.3.- Agua

El agua de amasado debe estar limpia y libre de sustancias que puedan dañar al hormigón o al acero, y estará constituida por la añadida directamente a la amasada, y por la procedente de la humedad de los propios áridos.

2.4.- Aditivos y adiciones

Los aditivos y adiciones más empleadas en el hormigón proyectado por vía seca son los acelerantes (polvo ó líquido), el humo de sílice (polvo ó slurry), los estabilizadores de fraguado, las fibras de acero y las cenizas volantes.

Los aditivos y adiciones más empleadas en el hormigón proyectado por vía húmeda son los acelerantes (líquido ó en polvo), los superplastificantes, el humo de sílice (polvo ó slurry), los estabilizadores de fraguado, los reductores de rebote, las fibras de acero o polipropileno y las cenizas volantes.

Siguiendo el orden natural de fabricación del hormigón proyectado, a continuación, se detallan las características particulares, y los efectos de algunos de ellos en el producto final.

Aditivos superplastificantes y estabilizadores de fraguado

Para el caso particular de la vía húmeda, la mezcla debe transportarse desde la planta hasta el tajo, permitiendo allí el bombeo de la misma. Por ello, al margen de un detallado estudio de la mezcla de áridos a emplear, se emplearán aditivos superplastificantes capaces de reducir el agua de amasado, y garantizar la consistencia adecuada durante la puesta en obra del hormigón.

Atendiendo a la manejabilidad prevista (p.ej. trabajos en túneles por la noche), es habitual el uso de aditivos estabilizadores de fraguado. Con estos aditivos, tras las correspondientes pruebas de campo para determinar la dosificación óptima en cada caso, se consigue mantener una consistencia adecuada para trabajar transcurridas varias horas (hasta 36 horas), sin penalizar las características del hormigón proyectado, ya que el proceso se detiene hasta que se añade el aditivo acelerante en la boquilla del robot.



Hormigón bombeable



Hormigón no bombeable

El uso de aditivos estabilizadores de fraguado en la proyección de hormigón por vía seca, es necesario cuando la humedad de los áridos es superior al 5%, y el tiempo de transporte superior a 1,5 horas.

Sílice coloidal

El avance e innovación tecnológica constante, favorecida por el importante volumen de obra de estos tiempos y por las crecientes exigencias de Proyecto de las mismas, han propiciado el desarrollo e implementación de sistemas y productos orientados a mejorar las características del hormigón proyectado.

Un ejemplo de todo ello, es el uso cada vez más extendido, de sílice coloidal en la fabricación de hormigón proyectado. Con el empleo de estos aditivos se consiguen entre otros los siguientes efectos:

- Una mayor cohesión de la mezcla, así como un incremento de la resistencia a la

adherencia de la misma sobre el soporte.

- Aumento de las resistencias a compresión tanto iniciales como finales, permitiendo reducir la dosificación del aditivo acelerante.
- Reducción del rebote, hasta niveles menores del 10%, mejorando el rendimiento de colocación de fibras en el caso de ser empleadas.
- Incremento en la densidad del hormigón, con penetraciones de agua menores de 30 mm.
- Reducción del polvo en la zona de trabajo.
- Mejora de rendimiento de colocación en zonas de bóveda.

Acelerantes de fraguado

Es el aditivo específico del hormigón proyectado, y de su comportamiento depende en parte, el éxito en la ejecución del túnel. El efecto del acelerante en el fraguado inicial y en el endurecimiento varía mucho en función de la clase y tipo de cemento, de la cantidad de agua, y de la temperatura de la mezcla. De forma genérica, la incorporación de un acelerante de fraguado produce un aumento de la resistencia inicial, y una disminución en la resistencia final, tomando como referencia una muestra del hormigón de la cuba sin pasar por el robot.

La base química de estos aditivos son los silicatos, aluminatos e hidróxidos, y su dosificación comprende rangos de trabajo en torno al 4-6% en el caso de los aluminatos, del 8-12% en el caso de los silicatos, y del 4-8% en el caso de los libres de álcali, siempre referido sobre el peso del cemento/aglomerante.

La disminución de resistencias a compresión empleando uno u otro tipo de acelerante puede oscilar entre el 50% de los silicatos, el 20-25% de los aluminatos y el 2-5% de los acelerantes libres de álcali.

Para el sostenimiento de túneles se recomienda el empleo de acelerantes a base de aluminato, o libres de álcali, por los problemas de adherencia a las armaduras de los acelerantes a base de silicato y por la disminución de resistencias finales.

La actual tendencia, conduce a un progresivo incremento del uso de aditivos libres de álcali en la ejecución de túneles. Hasta el momento, se han introducido en el 20% de las obras ejecutadas en España por el sistema de vía seca y en un 10 % en vía húmeda.

Se trata de productos no cáusticos, que no contienen hidróxidos alcalinos solubles, y con un pH entre 3 y 5, lo que contribuye a la salud y seguridad en el trabajo.

El efecto negativo sobre las resistencias finales es notablemente menor, proporcionando unas elevadas resistencias iniciales sin merma de la impermeabilidad de dicho hormigón, lo que representa un nuevo concepto de diseño de mezcla.

En cualquier caso, recopilando las experiencias recientes (aún limitadas en España, en comparación con acelerantes de base aluminato), se pueden proponer una serie de recomendaciones de uso en el caso de utilizar este tipo de aditivos acelerantes:

- i) Emplear cementos del tipo CEM I 52,5 R
- ii) Considerar aditivos superplastificantes de última generación
- iii) Reducir la relación A/C lo más posible permitiendo el transporte y puesta en obra del hormigón

Un aspecto fundamental del uso de acelerantes libres de álcali es, sin duda, el factor económico. Al margen de las ya mencionadas ventajas relativas a la salud y seguridad en el trabajo, cabe destacar la posibilidad de optimizar la fórmula de trabajo reduciendo la cantidad de cemento para obtener la resistencia final requerida. Recientes aplicaciones han permitido diseños de mezcla con 310 kg de cemento/m³, para obtener resistencias de 30 MPa a 28 días.

Otras de las ventajas derivadas del empleo de este tipo de acelerantes, reside en que su composición química (a diferencia de los tradicionales acelerantes de base aluminatos) reduce la colmatación y obturación de los drenajes del túnel.

Este hecho, no es relevante de cara a la ejecución de la obra, pero es muy interesante desde el punto de vista de la Propiedad o del Concesionario de Explotación de la misma, ya que rebaja de forma sensible los gastos de mantenimiento de los sistemas de drenaje.



Detalle de drenajes de túnel obturados

3.- Dosificaciones del Hormigón Proyectado

Generalmente se recomienda dosificar los materiales en peso. La curva composición deberá tener una granulometría que encaje en el huso granulométrico correspondiente, normalmente 0-8 ó 0-12. Así, como primera aproximación, la dosificación de cemento será de unos 400 kg/m³, pudiéndose rebajar si se emplea humo de sílice o acelerantes libres de álcali.

En el caso de la vía húmeda, la relación agua/cemento estará comprendida generalmente entre 0,40 y 0,50, función entre otros, de la variación del módulo de finura de los áridos y

su naturaleza, con el fin de conseguir una consistencia adecuada para la máquina de proyección (cono entre 12 y 18). El límite superior no se deberá exceder para garantizar que la química de los acelerantes y superplastificantes, indispensable en esta aplicación, funcione adecuadamente.

La dosificación usual de los acelerantes de fraguado es del 4-5% del peso del cemento tanto en polvo como en líquido, salvo los acelerantes a base de silicato, ya en desuso, que tal y como se ha comentado anteriormente, necesitan dosificaciones del 10-12%. La dosificación de los superplastificantes y estabilizadores se establecerá mediante pruebas en la misma obra, y dependerá de los áridos, del cemento, y del tiempo de manejabilidad. La adición a base de humo de sílice polvo se añadirá en una dosificación entre el 4-10%, y las cenizas volantes en un porcentaje no superior al 15-20%, según el tipo de cemento.

Siempre es necesario realizar ensayos previos en la misma obra con el fin de ajustar dosificaciones de áridos, cemento, agua, aditivos y adiciones de acuerdo con las condiciones existentes, para cumplir con los requisitos del Proyecto.

Para la preparación de la mezcla del hormigón, tanto en vía seca, como en vía húmeda, se recomienda emplear una planta con mezcladora, a ser posible de eje vertical, ya que las exigencias técnicas y las características de sostenimiento, obligan a una preparación y mezcla de los componentes homogénea, sobre todo con la incorporación de adiciones y aditivos, fundamentales en la tecnología del hormigón proyectado.



Planta de Hormigón con mezcladora

Muchas de las causas del mal funcionamiento de las máquinas de proyectar, son ocasionadas por una mezcla en plantas dosificadoras, sin mezcladora, o la incorporación de los aditivos y adiciones en el tajo de aplicación, sin un amasado adecuado.

Una “herramienta” tan utilizada en el sostenimiento de túneles y taludes, como es el hormigón proyectado, no depende de “milagros”, por el contrario, necesita instalaciones contrastadas y bien estudiadas, que permitan desarrollar una mezcla y transporte adecuados según las normas establecidas, para conseguir las características finales de dicho hormigón proyectado, y alcanzar los requerimientos solicitados por el proyectista.



Equipo dosificador de aditivos en planta

Otro aspecto básico es el estudio de las características de los áridos; granulometrías, densidad, humedad, y coeficiente de absorción. Parámetros, todos ellos, fundamentales tanto en las fases iniciales de diseño de la mezcla, como en la fase de ejecución.

No olvidando nunca, que un sostenimiento de un túnel o talud tiene, además del fin constructivo, una responsabilidad en la seguridad de los equipos y dotaciones humanas que intervienen en la Obra.

Hormigón Proyectado H 25/30

Producción

Transporte

CEM I 42,5:350-450 kg/m³
 Áridos: 1.000 l
 Tamaño: 0-12; 0-15
 Humedad: < 4 %
 Relación A/C: < 0,1

Tiempo máximo de Transporte: 1 hora

Vía Seca: Producción y Transporte

Hormigón Proyectado H 25/30

Producción


Transporte

CEM I 42,5:350-450 kg/m³
 Áridos: 1.000 l
 Tamaño: 0-12; 0-15
 Humedad: < 9 %
 Relación A/C: < 0,2

Tiempo máximo de Transporte: 6 horas

Vía Semihúmeda: Producción y Transporte

Hormigón Projectado H 25/30



<p>CEM I 42,5:350-450 kg/m³ Áridos: 1.700 kg <i>Tamaño: 0-12; 0-15</i> Relación A/C: < 0,5 Superplastificante: 1 % Estabilizador: < 2 % Adiciones: Opcional Cono: 18-20</p>	<p>Tiempo máximo de Transporte: 36 horas</p>
--	---

Vía Húmeda: Producción y Transporte

4.- Ensayos previos “in situ”

La composición del hormigón debe determinarse en el curso de ensayos, y en ellos, debe estudiarse las propiedades exigidas. Dichos ensayos deben realizarse en la obra y con antelación al comienzo de la misma, empleando las instalaciones y los componentes del hormigón definitivos. La evaluación posterior dependerá del resultado de los ensayos individuales.

Para la determinación de la composición del hormigón (contenido de cemento, áridos, y acelerante) deberán ensayarse diferentes mezclas. Además, se debe ensayar un hormigón de igual composición sin aditivo acelerante (hormigón patrón) con objeto de determinar la caída de resistencias.

Este hormigón testigo se utilizará también para comprobar la premezcla en las condiciones de la obra. Debido a la inevitable dispersión de resultados en el hormigón proyectado, la mezcla diseñada deberá alcanzar una resistencia superior a la especificada.

En el Apartado 5 de este artículo, se incluye un ejemplo de dosificación de hormigón proyectado de una obra reciente.

5.- Puesta en obra

5.1.- Maquinaria: Vía seca y vía húmeda

Existen tres procesos de proyección: vía seca, vía húmeda y vía semihúmeda. El sistema de la vía seca resulta satisfactorio, aunque ha visto mermado su empleo por la optimización y rendimientos alcanzados en los últimos años por el sistema de la vía húmeda. La vía húmeda conlleva disponer de más servicios. El sistema de la vía semihúmeda, es un proceso que evita que la mezcla seca se disperse, sobre todo el cemento, a la hora de proyectar. Hay que hacer las siguientes consideraciones sobre estos 3 tipos de sistemas de gunitado.

El sistema de hormigón proyectado por **vía seca** requiere unos equipos especializados.

Esquemáticamente, el proceso se resume de la siguiente forma: El cemento y los áridos se mezclan hasta conseguir una perfecta homogeneidad; se introduce la mezcla en un alimentador, entrando en la manguera mediante un distribuidor; la mezcla se transporta mediante aire a presión hasta una boquilla o pistola especial, la cual va equipada con un distribuidor múltiple perforado, a través del cual, se pulveriza agua a presión que se mezcla con el conjunto cemento/áridos. Finalmente la mezcla ya húmeda se proyecta sobre el soporte a gunitar.

El sistema de hormigón proyectado por **vía húmeda** se puede dividir en 2 procesos distintos: Flujo diluido (rotor) y Flujo denso (bomba), diferenciándose en el sistema de transporte de la mezcla de hormigón, aire comprimido en el caso del flujo diluido, y mediante bombeo en el flujo denso. Con ambos procesos se consiguen grandes rendimientos, cubriendo sobradamente las aplicaciones de las máquinas de vía seca.

Las máquinas de vía húmeda por flujo denso se han situado en un lugar privilegiado en el mercado español, y se limitan a un bombeo de la mezcla a través de mangueras especiales hasta una boquilla provista de un chorro de aire comprimido, con lo que se obtiene un hormigón de compactación suficiente.

Los recientes progresos tanto de nuevas máquinas como de aditivos, han conducido a esta tecnología a un sistema perfectamente conocido, con baja formación de polvo y el control de la relación agua/cemento.



Equipos de proyección por vía húmeda y vía seca

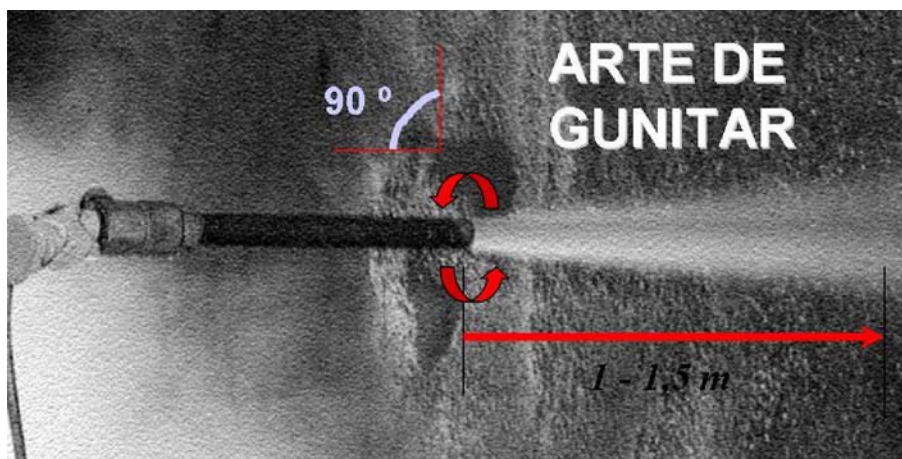
El sistema de hormigón proyectado por **vía semihúmeda** es idéntico en sus primeras fases al de la mezcla seca, solo difiere en que permiten humidades de áridos de hasta el 10 % y que a una distancia de unos 5 m de la boquilla se adiciona el agua, mejorándose las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla.

Otra ventaja de este sistema, es que evita el polvo resultante de la proyección, así como la pérdida de cemento en la mezcla al salir de la boquilla. Además el agua se mezcla perfectamente durante esos 5 m, obteniéndose un hormigón más homogéneo y con una relación agua/cemento idónea.

5.2.- Aplicación

La calidad de la gunita depende fundamentalmente de los operarios, es esencial que éstos asistan a cursillos, y reciban una formación completa de su especialidad.

El Capataz, Jefe de Equipo, o Encargado debe poseer una gran experiencia, y haber prestado durante un mínimo de cinco años servicio como gunitador. El gunitador, debe por lo menos haber pasado por un aprendizaje de un año de duración, y poseer experiencia en trabajos de naturaleza semejante.



Arte de Gunitar

La experiencia del gunitador deberá probarse, para ello, se ensayará con un revestimiento de paneles de prueba como parte del programa de ensayos previos a la construcción.

Un equipo mínimo consta de:

- Un gunitador
- Un maquinista
- Un operador de la planta de mezclado
- Un Capataz o Jefe de Equipo

Eventualmente, será necesario, que el gunitador tenga un ayudante, así como contar con varios operarios para realizar el transporte, la colocación de andamiajes, etc.

Sería de desear que se introdujeran dentro de las categorías de trabajo en la construcción las de gunitador y maquinista, dados el volumen creciente y la variedad de aplicaciones del hormigón proyectado.

Para realizar una buena aplicación del hormigón proyectado es requisito esencial la correcta organización del trabajo. Esta corre a cargo del Capataz o Jefe de Equipo que dispondrá los trabajos y observará, que todos los equipos funcionen correctamente, tomando para ello, las precauciones necesarias y adoptando las correspondientes medidas preventivas.

Es fundamental que antes de comenzar el trabajo se decidan las instalaciones, ya que éstas servirán de base al funcionamiento posterior y al buen resultado del sistema, y por ello, es muy importante elegir debidamente las zonas de acopio de acelerantes, la situación y distancia de la planta de mezclado (transporte), y la situación de la maquina gunitadora, que debe ocupar el punto más ventajoso para cubrir la zona de trabajo en abanico.

En túneles:

La instalación de la planta de mezclado deberá ser exterior, y por medio del transporte elegido se introducirá la mezcla dentro del túnel hasta la zona de gunitado. En este tipo de trabajo conviene eliminar toda la mano de obra posible, automatizando los sistemas de recepción de mezcla, así como los de proyección.



Campos aplicación: Túneles y taludes

En taludes:

En este caso, conviene que la planta de mezclado se sitúe en la parte superior, si hay acceso, con lo cual se ganará en presión y caída de los materiales por gravedad hasta la situación de la máquina gunitadora.

5.3-. Técnicas de Ejecución

Las técnicas de ejecución que se van a detallar a continuación, son producto de la experiencia de muchos años de trabajo en el campo de la gunita y del hormigón

proyectado, lo que significa, que se debe tender hacia su utilización para unificar criterios y ejecuciones.

En las especificaciones del hormigón proyectado, independientemente de las resistencias a compresión necesarias, tendrá que aparecer, el acabado necesario, dosificación y espesores correspondientes, pudiendo influir tanto en la elección de la máquina y de la dotación del equipo humano, como en el orden del trabajo y la colocación de andamiajes o robot.

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

El gunitador debe dirigir al maquinista mediante señales con la mano respecto a la producción y velocidad del suministro. Si éste es demasiado fuerte, la presión debe ser disminuida, así como la velocidad del motor, con el fin de producir la mejor proyección. Estos factores contribuyen a la correcta alimentación de la máquina.

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

Como resumen podemos definir que el equipo del gunitado debe estar conjuntado y conocer una a una, todas las operaciones, para que sin necesidad de dirigirles, cada uno de ellos solventa las distintas situaciones que se puedan presentar.

Preparación de superficies

Todo tratamiento de hormigón proyectado (gunita) necesita una preparación de superficies, según como sea el soporte. Esta preparación de superficies, será con chorro de aire a presión, chorro de aire y agua a presión, chorro de agua a alta presión chorro de arena, en este último caso, para los soportes de hormigón (Reparación).

Como norma, se debe retirar los restos de materiales sueltos o de otros oficios que estén sobre el soporte, evitando la creación de falsas zonas que no adhieran al revestimiento posterior.

En líneas generales se deberá hacer siempre la preparación de superficies mediante humectación del soporte para conseguir unas condiciones adecuadas.

Colocación de armaduras

Los sistemas normalmente utilizados de fijación de mallas se pueden denominar como fijaciones ligeras.

En los casos de obras de Ingeniería Civil, como túneles, muros y taludes se hace necesario la fijación por medio de sistemas pesados, como son bulones, barras, anclajes, etc.

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

Proyección

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

1º Comprobación de las mangueras de proyección para ver si están limpias, para ello se conectan a un compresor que disponga de un manómetro, si éste muestra una presión superior a la normal, quiere significar que las mangueras están sucias. En este caso, deben limpiarse doblándolas, torciéndolas o golpeándolas suavemente con un martillo, volviendo a dar aire y expulsando así el material alojado en los conductos.

2º Conectar las mangueras formando el menor número posible de curvas, y a ser posible sin ningún rizo, para ello, las uniones de manguera se asegurarán debidamente.

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

Esta comprobación se hará quitando la tobera de la boquilla, y desatracando si es preciso, los eyectores de agua o aditivo acelerante a la misma. Esta operación se deberá efectuar con la boquilla hacia abajo, para prevenir que la corriente de agua o aditivo vuelva hacia atrás por la manguera.

4º Estando funcionando el agua o aditivo se deberá dar entrada al aire comprimido exclusivamente, con lo cual, se examinará el abanico que forma la pistola, viendo inmediatamente si existe algún fallo de suministro en los eyectores, para lo cual, visto éste, se deberá solucionar limpiando o cambiando la boquilla. Si el abanico es débil quiere decir que no hay suficiente presión de aire, en este caso, se deberá incrementar la misma.

Una vez pasada esta operación, el gunitador está preparado para comenzar el trabajo. La primera operación será la de proyectar una mezcla de aire y agua sobre el soporte, a fin de humedecer la superficie. Esta práctica es recomendable para todo tipo de soporte, hormigón, madera, arpillera, roca, tierra o acero.

La manguera esta ahora conectada con la boquilla y la gunitadora, y la proyección puede comenzar. El gunitador mantendrá la boquilla (pistola) hacia abajo, en espera del suministro de la mezcla.

Cuando la mezcla llegue, regulará rápidamente el suministro y dirigirá el chorro al soporte al revestir. La distancia entre el soporte y la boquilla o pistola estará situada entre 0,6 y 1,5 m, moviendo la boquilla rítmicamente en series de rizos de lado a lado y de arriba abajo, trabajando así de modo uniforme.

En caso de cualquier irregularidad en el suministro de la mezcla, o de escasez de este

material, el gunitador debe dirigir la boquilla fuera del trabajo, hasta que la alimentación vuelva a ser adecuada.

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

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

La habilidad y conocimientos del gunitador determinarán la calidad del trabajo terminado, así como el rendimiento del mismo.

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

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

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

Rechazo o rebote

El rechazo es la pesadilla del gunitador y del gunitado. Un gunitador que haya aprendido a controlar el rebote es muy difícil de encontrar.

El rebote está formado por los componentes que no se adhieren a la capa de gunitado o a las armaduras, saliendo rebotados fuera del lugar adecuado. La proporción inicial de rebote es alta cuando el chorro de mezcla se dirige directamente al soporte sobre el que se trabaja, y también cuando se dirige sobre la armadura, pero la formación de una capa amortiguadora sobre el soporte (adherida por la baja relación agua/cemento), reduce dicha cantidad. Por ello, los espesores gruesos tienen una menor proporción de rebote y el espesor delgado tiene los más altos porcentajes.

Para el cálculo del rebote existen muchas teorías, tanto prácticas como analíticas, ya que desde un punto de vista económico tiene mucha importancia, incidiendo en el coste del hormigón colocado. En lo que a pérdida de materiales se refiere, el fenómeno de rebote no tiene tanta importancia, pero sí la tiene y mucha, en cuanto al rendimiento del equipo de colocación.

El porcentaje de rechazo, en cualquier y situación, depende de:

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

Curado

El curado de la gunita es importante en espesores delgados, para ello, se recomienda que la superficie terminada se mantenga continuamente mojada al menos durante los 7 días siguientes. También se puede proteger mediante arpilleras, manteniendo el agua de fraguado.

Se pueden utilizar productos de curado en forma de membrana superficial, pero éstos no deben utilizarse en los casos siguientes:

Áreas que se gunitarán de nuevo
Zonas donde esté previsto pintar la superficie
Cuando su aplicación esté desaconsejada desde el punto de vista estético

En líneas generales, se deberán tener en cuenta los detalles normales de curado de hormigón en masa.

Algunas de las técnicas más usuales

Como técnicas complementarias están las de protecciones de superficies próximas, interrupciones del trabajo, y aplicaciones especiales.

Las primeras, las zonas próximas al trabajo, que no vayan a ser tratadas se deberán proteger del rebote o rechazo con film de polietileno o papel impermeable adecuados. Así mismo, se protegerán los elementos, máquinas o estructuras que pueden ser dañados por el polvo.

En cuanto al segundo, el gunitado se debe suspender cuando la fuerza del viento impida que el gunitador efectúe una correcta colocación de la gunita, cuando haya temperaturas próximas a 0º, o en caso de lluvia que pueda arrastrar el cemento de gunita.

En el caso tercero, a veces es necesario un empleo de gunita de características especiales, como pueden ser gunita ligera de gran capacidad aislante o de resistencia al fuego.

En estos casos, todo dependerá del tipo de árido que se emplee siendo normalmente áridos ligeros, para ello, habrá que poner un especial cuidado en su granulometría, así como en el proyecto y en la ejecución.

6.- Caso Práctico. Túneles UTE Eix-Berguedá

Finalmente, se ha considerado adecuado completar el artículo, incluyendo un ejemplo real y reciente, en el que se integran los últimos desarrollos tanto a nivel de aditivos, como de maquinaria.

El ejemplo elegido corresponde a los túneles recientemente calados por la UTE Eix-Berguedá (FCC, COMSA, COPISA Y COPCISA), en la obra Desdoblamiento Eje Pirenaico C-16 (Barcelona) que forma parte de del itinerario Barcelona-Tolosa de Languedoc-Orleans, integrado en la red de carreteras de interés comunitario según el acuerdo de Ginebra de 1.985.



El tramo en ejecución incluye dos túneles paralelos 2 x 950 m de longitud y sección transversal de 110 m², con hormigón proyectado de 30 MPa de resistencia característica.

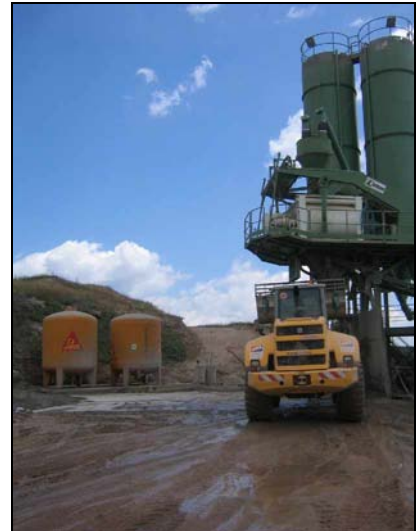
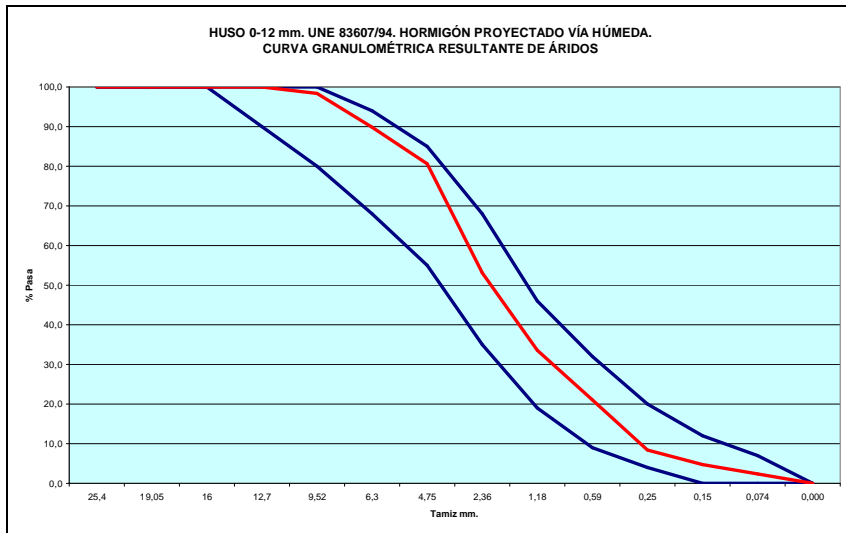
Para ello, los responsables de la UTE optaron por montar una planta propia de obra, capaz de fabricar y suministrar los diferentes hormigones contemplados en el Proyecto.

Después de una serie de pruebas, analizando los áridos de la zona (Velvor), y el cemento disponible (CEM I 52,5 R), se propuso la siguiente dosificación:

Cemento (CEM I 52,5 R)	425 kg	
Arena 0/5	1053 kg	61%
Arena 0/2	259 kg	15%
Grava 5-10	414 kg	24%
Sikatell 200	4,25 kg	
Sika ViscoCrete SC 305	4,29 kg	
Relación A/C	0,42	

Sigunita L 53 AFS (4%) o Sigunita L 22 R (4%)

En la gráfica que se muestra a continuación, se representa la curva resultante de la mezcla propuesta, junto con los límites del huso 0-12 mm, de la Norma UNE 83.607/94 Hormigón Proyectado Vía Húmeda.



A falta únicamente de concluir la destroza, se ha utilizado acelerante libre de álcali en la mayor parte de la excavación, empleando acelerante aluminato en algunas zonas con cerchas.

Por otro lado, en referencia a la maquinaria empleada en la obra, la UTE dispone de un robot Sika PM 500 de última generación.

7.- Conclusiones

Analizando la evolución del mundo del hormigón proyectado en estos años, y particularmente las labores subterráneas, se aprecian cambios significativos. Asimismo, España dada su orografía y el volumen de obra, está considerada como un país de referencia a nivel mundial en estas tecnologías, tanto a nivel de maquinaria y productos, como de personal especializado.

En ese entorno favorable, como no podría ser de otra forma, las exigencias son cada día mayores; resistencia, durabilidad, equipos robotizados, mejores condiciones en los puntos de trabajo, etc.

Los diferentes proyectos nacionales y europeos de I+D+i, están orientados en parte a alcanzar estos objetivos. La formación constante, la difusión de los nuevos desarrollos, y su rápida implementación en la obra, deben ser la apuesta y el compromiso de cuantos han hecho de este mundo, su dedicación.

En este artículo, se contemplan algunos de los parámetros involucrados en la tecnología del hormigón proyectado. De ellos, y de la experiencia acumulada se derivan las siguientes consideraciones:

- i) Las especificaciones exigidas al hormigón proyectado condicionan el proceso de fabricación del mismo. Cada vez más, se debe controlar la cadena de fabricación, conociendo cada etapa, y mejorando las deficiencias que pudieran presentarse. El hormigón proyectado es el resultado de esa cadena y su éxito depende de ello.

- ii) Los nuevos proyectos, las nuevas metas, sólo se alcanzarán con el desarrollo continuo de tecnologías y sistemas, pero esas innovaciones deben ser implementadas en la obra.
- iii) Obtener una dosificación óptima de hormigón proyectado, depende en gran medida del tiempo y medios de que se disponga en las etapas de diseño y pruebas. No obstante, en producción se presentan variables no contempladas en esas etapas previas, por lo que las dosificaciones deben someterse a un seguimiento continuo, mejorando y optimizando el proceso durante la obra.
- iv) Siguiendo el orden del proceso, en la fabricación, es aconsejable garantizar un amasado completo y homogéneo de la mezcla. Para ello, una planta equipada con amasadora y dosificadores de aditivo sincronizados con el sistema de carga consiguen los mejores resultados.
- v) Por su parte, el transporte y concretamente el medio empleado, puede influir de forma significativa en el resultado final si no se adoptan las medidas de control correspondientes. Especial atención merecen tanto el estado de las cubas, como el agua que de una u otra forma pudiera añadirse a la mezcla en esta etapa.
- vi) La puesta en obra del hormigón proyectado es sin duda la diferencia fundamental respecto a otros hormigones. Tal y como se ha desarrollado a lo largo del artículo, el personal, los equipos y la organización de los tajos son aspectos críticos del proceso. La formación y experiencia de los equipos, el empleo de maquinaria apropiada con los nuevos desarrollos y la capacidad de organización y coordinación de los responsables dependerá el éxito de los trabajos.

Madrid, octubre 2.006