

# SHOTCRETE

GUÍA CHILENA DEL HORMIGÓN PROYECTADO



Primera Edición



---

# SHOTCRETE

GUÍA CHILENA DEL HORMIGÓN PROYECTADO

---



Primera Edición

 **ICHI**  
Instituto del Cemento y  
del Hormigón de Chile

# Créditos

## SHOTCRETE - GUÍA CHILENA DEL HORMIGÓN PROYECTADO

### Preparado por

Sergio García Guzmán

### Publicado por

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile

### Revisión Técnica

Grupo de Colaboradores

### Imágenes Portada

Gentileza: AtlasCopco y EPC Barchip

### Gestión y Producción

Sebastián García Morales

### Imágenes

Christian Manzano y Luis Rojas

### Registro de Propiedad Intelectual

244981

### Colaboradores del ICH:

Rodrigo Caballero Rivera  
Harmut Claussen Steuer  
Ismael Anabalón Retes  
Alexandre R. A. Gomes  
Bernardo Vicencio Escobar  
Carlos Muñoz Vargas  
Eleodoro Higuera Jara  
Daniel Parra Lobos  
Gian Franco Compagnoni

### Colaboradores Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO:

Heily Glaves Cisternas  
Pedro Araya Opazo  
Cristian Araya Cisternas

### Aportes Extranjeros a esta Guía:

Stefan Bernard, Australia  
Marc Jolin, Canadá  
Matthias Reinhold, Inglaterra  
Volker Wetzig, Suiza

[www.shotcrete.cl](http://www.shotcrete.cl)

Socios Fundadores ICH

---

E-mail: [info@ich.cl](mailto:info@ich.cl)  
[www.ich.cl](http://www.ich.cl)





# Prólogo



ATLASCOPCO



BASF



BEKA



BEKAERT



EPC



GRACE



LEIS



LIEMUN



MSA



SIKA

BUILDING TRUST



ROBOCON

Esta Guía contiene recomendaciones técnicas de carácter práctico para aplicaciones de hormigón proyectado en obras civiles y minería. Corresponde a una adaptación de la guía "Shotcrete in Australia – Recommended Practice. 2ed." y ha sido complementada con antecedentes de fuentes europeas como EFNARC y la Guía Austriaca del Shotcrete, además de incorporar un importante cúmulo de conocimientos y experiencias de la práctica nacional en construcción con hormigón proyectado.

La preparación de esta guía no hubiese sido posible sin la valiosa participación de numerosos colaboradores técnicos, quienes nos han aportado su experiencia tanto en los cursos que el ICH ha dictado a más de 300 profesionales en los últimos dos años y son también en la preparación y revisión del borrador original. Este trabajo ha sido coordinado por el Ingeniero Sergio García, quien ha liderado el desarrollo, que como Institución hemos realizado en temas ligados a la especificación, capacitación y certificación en hormigón proyectado.

También debemos destacar los aportes y recomendaciones de los expertos internacionales en Shotcrete quienes nos han visitado desde la realización de Expo-Hormigón de 2013 en adelante, Stefan Bernard, Marc Jolin, Volker Wetzig y Matthias Reinhold.

Una mención especial merece el trabajo que hemos podido realizar en conjunto con el área de calidad de la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco y con sus profesionales, quienes nos han abierto la puerta de sus proyectos para realizar un trabajo de mejora de calidad y seguridad en las obras de hormigón proyectado y cuyas conclusiones se han vertido en esta guía.

Esperamos que este esfuerzo sea útil para todos los profesionales y empresas que están abordando proyectos que incluyen el uso de hormigón proyectado. Esta primera edición de la guía esperamos que sea seguida de nuevas versiones mejoradas y expandidas, con el aporte de todos sus usuarios y con las nuevas experiencias que vayamos acumulando en el uso del hormigón proyectado en nuestro país.

Augusto Holmberg F.  
Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile  
Santiago – Septiembre 2014



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....</b>	<b>11</b>
Alcances.....	11
Definiciones.....	11
Tipos de hormigón proyectado.....	13
Usos del hormigón proyectado.....	14
Historia.....	18
<b>CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....</b>	<b>21</b>
Consideraciones de diseño para estructuras de hormigón proyectado.....	21
Consideraciones de diseño para el refuerzo.....	23
Consideraciones de diseño para aplicaciones en obras civiles subterráneas.....	24
Consideraciones de diseño para la minería.....	26
<b>CAPÍTULO 3: PROPIEDADES DEL HORMIGÓN PROYECTADO - SHOTCRETE.....</b>	<b>29</b>
Docilidad.....	29
Resistencia a la compresión.....	29
Resistencia temprana.....	30
Resistencia a la flexión.....	30
Tenacidad.....	31
Densidad.....	31
Módulo de elasticidad.....	31
Contracción por secado.....	32
Fluencia lenta (Creep).....	32
Coeficiente de expansión térmica.....	32
Durabilidad.....	32
Unión al sustrato.....	33
<b>CAPÍTULO 4: MATERIALES CONSTITUYENTES.....</b>	<b>35</b>
Cemento.....	35
Materiales finos complementarios.....	35
Áridos.....	35
Agua de mezclado.....	35
Aditivos químicos.....	35
Fibras de refuerzo.....	37
Mallas o barras de acero.....	39
<b>CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LA MEZCLA.....</b>	<b>41</b>
Generalidades.....	41
Hormigón proyectado por vía húmeda.....	41
Hormigón proyectado por vía seca.....	42
Diseño de mezcla para piscinas.....	42
Mezclas especiales.....	43
Curvas granulométricas del árido combinado.....	43
Solución de problemas en el diseño de mezclas.....	45
<b>CAPÍTULO 6: MAQUINARIA Y EQUIPOS PARA SHOTCRETE.....</b>	<b>51</b>
Generalidades.....	51
Equipo para mezcla seca.....	51
Equipo para mezcla húmeda.....	53
Equipos auxiliares.....	53

<b>CAPÍTULO 7: DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO.....</b>	<b>57</b>
Dosificación de shotcrete vía húmeda.....	57
Dosificación de shotcrete vía seca.....	58
Regularidad de la mezcla.....	58
<b>CAPÍTULO 8: DESPACHO.....</b>	<b>59</b>
Generalidades.....	59
Agitador sobre camión.....	59
Descargas verticales.....	59
Bombeo.....	60
<b>CAPÍTULO 9: APLICACIÓN DEL HORMIGÓN PROYECTADO.....</b>	<b>61</b>
Generalidades.....	61
Servicios.....	61
Formación y entrenamiento.....	62
Seguridad.....	62
Shotcrete manual.....	63
Secuencias en la proyección de hormigón.....	70
Hormigón proyectado robotizado (mecanizado).....	73
<b>CAPÍTULO 10: REQUISITOS DE DESEMPEÑO.....</b>	<b>83</b>
Control de calidad – Q&A.....	83
Ensayos pre-construcción.....	83
Frecuencia de ensayo y pruebas.....	85
Sistemas de calidad.....	86
Alcances de la norma ISO 9001.....	86
<b>CAPÍTULO 11: MÉTODOS DE ENSAYO.....</b>	<b>89</b>
Introducción.....	89
Métodos par a la medición del hormigón fresco.....	89
Métodos para la medición de la resistencia temprana.....	92
Métodos para la medición de la resistencia en hormigón endurecido.....	93
Otros ensayos y mediciones.....	98
<b>CAPÍTULO 12: CLASES DE RESISTENCIA TEMPRANA DEL HORMIGÓN PROYECTADO.....</b>	<b>101</b>
Clases de hormigón proyectado.....	101
Clases de resistencia temprana.....	101
<b>CAPÍTULO 13: SALUD Y SEGURIDAD.....</b>	<b>103</b>
Generalidades.....	103
Equipo de protección personal (EPP).....	103
Aspectos específicos del operador y la faena.....	104
<b>CAPÍTULO 14: ACI 506 Y LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE TESTIGOS.....</b>	<b>107</b>
Generalidades.....	107
Aseguramiento de la calidad.....	107
Calificación del Hormigón Proyectado.....	108
<b>CAPÍTULO 15: REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>109</b>
Referencias.....	109
Bibliografía.....	110
<b>ANEXOS.....</b>	<b>113</b>
Anexo A: Pruebas de compatibilidad de materiales constituyentes del shotcrete.....	113
Anexo B: Ejemplo de Plan de Inspección y Calidad sugerido para Túneles Mineros.....	115

[www.shotcrete.cl](http://www.shotcrete.cl)

---

E-mail: [info@ich.cl](mailto:info@ich.cl)  
[www.ich.cl](http://www.ich.cl)

Socios Fundadores ICH

---







## 1

## CAPÍTULO

## Generalidades

## 1.1 Alcances

Esta guía ofrece una descripción de la tecnología y las mejores prácticas para el proceso del Hormigón Projectado (Shotcrete), materiales, especificaciones, equipamiento y ensayos. Así mismo, sugiere aquellos temas que deben ser examinados con detenimiento en relación al diseño estructural y de mezcla, sin pretender ser una guía detallada en estos tópicos.

Si bien esta guía ofrece una visión general de los procesos que participan en la proyección del hormigón y en los requisitos que se requieren para alcanzar un desempeño determinado, no reemplaza la necesidad y opinión de un especialista en los campos particulares que se discutirán en esta guía.

En relación a las técnicas de proyección, existe en este documento un mayor énfasis en las técnicas vía robotizada con mezclas húmedas por sobre la aplicación por vía manual (origen del Shotcrete). No se ha tenido la intención de pasar por alto el hormigón projectado por vía seca, método que posee su propio conjunto de ventajas en algunas situaciones particulares. Sin embargo, debido a las desventajas de este método en la construcción subterránea, la aplicación de mezcla húmeda robotizada se efectúa cada vez con más frecuencia para el soporte de rocas y siendo este tipo de aplicaciones las que con mayor frecuencia e intensidad se realizan en nuestro país es natural que tenga un tratamiento más detallado en esta guía. De todas maneras, la elección del proceso más adecuado a utilizar dependerá en definitiva de la aplicación particular de que se trate.

En la preparación de esta guía nos hemos basado principalmente en la "Recommended Practice – Shotcreting in Australia", complementada con lo que hemos considerado son las mejores prácticas del hormigón projectado de la industria europea, australiana, norteamericana y también con la experiencia nacional en el tema, especialmente en aspectos que son propios de nuestra realidad. Las diversas citas bibliográficas dan cuenta de esta diversidad de fuentes.

## 1.2 Definiciones

El término "Hormigón Projectado" se ha adoptado en Chile para la descripción del "Shotcrete" de acuerdo con la definición del "American Concrete Institute" (ACI), organización que lo define como un "hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla" (ACI Concrete Terminology).

Esta guía no pretende entregar una definición de todos los términos usados en construcción con hormigón, sino solo aquellos esenciales de uso común en la literatura y frecuentes en el vocabulario nacional referidos al hormigón projectado. Los términos puestos entre paréntesis corresponden al término original en inglés.

- **Adherencia (adhesión / bond)** - *característica que posee el hormigón projectado de pegarse al sustrato después de ser projectado neumáticamente a través de una boquilla.*
- **Aditivo (admixture)** - *cualquier material activo agregado al hormigón en pequeñas cantidades para modificar alguna de sus propiedades por acción física, química o física-química.*
- **Adiciones** – *materiales minerales finamente molidos utilizados en el hormigón con el fin de mejorar ciertas propiedades o para conferirle propiedades especiales.*
- **Acelerante (accelerator)** - *aditivo que normalmente se añade en la boquilla del hormigón projectado con el fin de aumentar la velocidad de hidratación del cemento, reducir la fluidez y provocar una rápida rigidización de la mezcla.*
- **Boquilla o Pitón (nozzle / gun)** – *pieza final por donde el shotcrete es projectado sobre el sustrato.*
- **Bolsa de arena (sand lens / pocket)** - *zona interior del hormigón projectado que contiene agregado fino sin mezclar (arena), con poca o ninguna cantidad de cemento, resultado en un mezclado pobre.*
- **Capa (layer / build-up)** - *aumento de espesor con sucesivas pasadas o capas de hormigón projectado.*

- **Capa de repaso (smoothing layer)** - corresponde a una capa fina de hormigón proyectado, aplicada generalmente con la intención de proporcionar una superficie uniforme. Se aplica sobre una capa inicial de hormigón proyectado. También se conoce como “capa de acabado”.
- **Cemento** - material aglutinante hidráulico definido en NCh148.
- **Cohesión (cohesion)** – capacidad de los componentes del hormigón o mortero para mantenerse totalmente mezclados de manera homogénea cuando son transportados, manipulados, descargados, bombeados o proyectados a través de la boquilla.
- **Especificación por desempeño (performance based specification)** – especificación técnica en que se explicitan las características de funcionamiento del hormigón proyectado, por ejemplo resistencia mecánica a compresión, resistencia a una edad particular, resistencia a flexión, densidad, tenacidad, etc., sin prescribir la forma en que ésta debe alcanzarse.
- **Especificación prescriptiva (prescriptive specification)** – especificación técnica en la cual se explicita la cantidad de alguno o todos los ingredientes del hormigón proyectado y también el proceso por el cual se produce y se aplica (por ejemplo: contenido de cemento por metro cúbico).
- **Exudación (bleeding)** - movimiento del agua desde el interior de la masa de hormigón hacia la superficie como resultado de la separación de la fase líquida de los ingredientes sólidos en la mezcla.
- **Escurrimiento/desprendimiento (sagging / sloughing)** - movimiento descendente del hormigón proyectado desde su punto de aplicación inicial.
- **Fibras (fibers)** – elementos cortos y de forma alargada y de alta capacidad a la tracción utilizados como refuerzo. Las fibras comercialmente disponibles son las de acero, polímeros de diversa composición y de vidrio resistente a los álcalis. Las fibras son normalmente incorporadas en el hormigón proyectado para aumentar la tenacidad.
- **FRS** – Shotcrete Reforzado con Fibra (por sus siglas en inglés)
- **Gunita (gunite)** – nombre original perteneciente a la compañía “Cement Gun Company” usado en 1907 en EE.UU. para referirse al primer mortero que se proyectó neumáticamente. Este mortero contenía agregado fino y un alto porcentaje de cemento. El término Gunita no se utiliza generalmente en Chile.
- **Hormigón proyectado por vía seca (dry-mix shotcrete)** - hormigón proyectado en que los componentes se transportan en estado “seco” mediante aire comprimido y donde el agua de hidratación es introducida en la boquilla junto con el acelerante. El material se mezcla al interior

de ésta y durante su proyección sobre el sustrato. La proyección se realiza mediante aire comprimido a alta velocidad.

- **Hormigón proyectado por vía húmeda (wet-mix shotcrete)** - hormigón proyectado en que los componentes se transportan en un estado húmedo por la línea de hormigón hasta la boquilla, en la cual se introduce el aire comprimido junto al acelerante, material que se mezcla al interior de ésta y durante su proyección sobre el sustrato. La proyección se realiza mediante aire comprimido a alta velocidad.
- **Hidratación (hydration)** - reacción química entre el cemento y el agua en el hormigón.
- **Hidrolavado (hydro-scaling)** - lavado con agua a alta presión que ayuda a mejorar la adherencia del hormigón proyectado con el sustrato. Se recomienda que esta actividad sea realizada por el operador del equipo de proyección.
- **Mortero (mortar)** – mezcla cementicia cuyo tamaño nominal del árido es de 5 mm o inferior.
- **Macro fibras (macro-fibers)** - fibras de gran longitud y diámetro relativo (usualmente largo superior a 25 mm, diámetro superior a 0.5 mm) utilizadas normalmente para desarrollar resistencia estructural luego del agrietamiento de la matriz de hormigón.
- **Micro fibras (micro-fibers)** - fibras de diámetro relativamente pequeño (usualmente menor a 0.30 mm) utilizadas para control de fisuración por retracción plástica, disminución de rebote y como protección contra el desconchamiento del hormigón a altas temperaturas.
- **Pitonero (nozzleman/sprayer)** - persona encargada del control de la boquilla y por tanto de la proyección del hormigón. El término “sprayer” se utiliza frecuentemente en la literatura anglosajona asociado al operador de equipo, para diferenciarlo de “nozzleman”, referido a la persona que proyecta shotcrete manualmente. En este documento se utiliza el término “pitonero” para referirse a la persona que proyecta manualmente y “operador de equipo robotizado” a aquel que proyecta mediante un equipo tele-comandado.
- **Pasada (pass)** - área conformada por el movimiento de la boquilla durante la operación de proyección de hormigón. Una capa de hormigón proyectado es usualmente construida haciendo varias pasadas.
- **Pulso de bombeo / pistonada (slugging)** - flujo intermitente de hormigón proyectado a través de la tubería de transporte producto de una operación de bombeo en una bomba de desplazamiento positivo.

- **Planchón de hormigón (fallout)** – Parte del hormigón proyectado que cae (se desprende) de la superficie de trabajo tiempo después de la proyección. No debe confundirse con “rebote”, referente a las partículas que saltan desde el sustrato o del hormigón ya proyectado durante el proceso de proyección.
- **Capa rápida (flash coat)** – capa fina de hormigón proyectado aplicada como sello o unión.
- **Rebote (rebound)** - parte del hormigón proyectado que es rechazada del elemento proyectado y cae lejos de ésta superficie durante el proceso de proyección, depositándose en el suelo o en superficies cercanas.
- **Razón a/c** – razón entre la cantidad de agua libre en la mezcla y la cantidad de cemento (en peso).
- **Sobre proyección (overspray)** – exceso de shotcrete colocado no intencionalmente en zonas que rodean el sustrato a proyectar.
- **Sobre espesor (over-thickness)** - exceso de hormigón proyectado depositado sobre el sustrato o superficie de trabajo.
- **Shotcrete<sup>24</sup> (sprayed concrete)** - hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla. Hormigón proyectado.
- **Saturado superficialmente seco (SSD)** – condición del agregado en que tiene sus poros saturados internamente y secos externamente.
- **Sustrato (substrate)** - superficie sobre la que se coloca el hormigón proyectado, por ejemplo suelo o roca. Incluye estructuras como marcos o armaduras cuando existen.
- **Tenacidad (toughness)** – comportamiento post agrietamiento del hormigón. Se mide a través de la energía acumulada bajo la curva carga – deflexión, resistencia residual u otro parámetro derivado a partir la curva carga - deflexión, en una muestra sometida a ensayo de flexión o tracción.

## 1.3 Tipos de hormigón proyectado

Usualmente se clasifica en dos tipos según el proceso de proyección:

### 1.3.1 Shotcrete por vía húmeda

Técnica en que el cemento, áridos, agua y otros componentes se procesan por lotes y se mezclan juntos en una planta o equipo móvil de mezclado, para luego transportarlos y descargarlos a una bomba, dónde la mezcla se transporta a través de un sistema de tuberías y mangueras a una boquilla desde la cual se proyecta neumáticamente sobre el sustrato. El aire comprimido se introduce en el flujo en la boquilla con el fin de proyectar el material hacia el sustrato. En este hormigón proyectado se incorpora el aditivo acelerante antes de ingresar a la boquilla. Ver Figura 1.1



Figura 1.1 Shotcrete por vía húmeda

### 1.3.2 Shotcrete por vía seca

Técnica en la que el cemento y agregados se procesan por lotes y se mezclan mecánicamente sin hidratar el cemento. El material es transportado neumáticamente a través de mangueras o tuberías a la boquilla, donde se introduce el agua de hidratación antes de proyectar. Este hormigón proyectado también puede incluir aditivos o fibras o combinación de ambos. Ver Figura 1.2



Figura 1.2 Shotcrete por vía seca

En Chile, la mayor parte del hormigón proyectado se aplica por el método de mezcla húmeda con equipo robotizado (se estima sobre el 70% del volumen total de shotcrete). Aun cuando en ciertas aplicaciones específicas se recomienda utilizar el proceso de mezclado en seco.

Tabla 1.1 Comparación de procesos de hormigón proyectado por vía húmeda y vía seca.

Ítem	Hormigón proyectado vía húmeda	Hormigón proyectado vía seca
Equipamiento	Bajo costo de mantenimiento. Mayor costo inicial.	Alto costo de mantenimiento. Menor costo inicial.
Mezclado	Mezcla exacta en planta por lotes. Puede utilizar hormigón premezclado en planta. Acepta agregados húmedos.	Mezclado en el lugar de trabajo o en planta de predosificado. Entregas por lotes. Pequeñas o grandes cantidades. Rendimiento afectado por humedad del agregado, limitado usualmente a un máximo de 6%. Requiere más mano de obra.
Rendimiento	Moderada a alta tasa de colocación, de 3 a 10 m <sup>3</sup> /hora para proyección manual, hasta 25 m <sup>3</sup> /hora con equipos de hormigón robotizado.	Baja tasa de colocación, usualmente de 1 a 6m <sup>3</sup> /hora.
Rebote	Bajo rebote (típico de 5% a 15%) dependiendo de la mezcla, diseño y aplicación.	Generalmente alto rebote (sobre 30% y hasta 60%) dependiendo de condiciones del lugar y aplicación.
Polución	Baja generación de polución en el lugar de trabajo.	Polución notablemente alta.
Calidad del hormigón proyectado	Calidad consistente.	Potencialmente mayor variación de calidad en el lugar de colocación.
Transporte a través de ductos	Cortas distancias de transporte (hasta 200m) dependiendo de condiciones, equipos y mezcla.	Mayores distancias de transporte (hasta 500m) con equipos adecuados.
Aplicaciones	Se adapta mejor a altos volúmenes de aplicación.	Se adapta mejor a bajos volúmenes de aplicación. Ideal para iniciar y detener operaciones sin dificultad. Adecuado en lugares de acceso remoto o limitado, o cuando la entrega de hormigón premezclado es logisticamente compleja.

## 1.4 Usos del hormigón proyectado

### 1.4.1 Generalidades

El hormigón proyectado juega hoy en día un papel esencial en la industria de la construcción civil y minera. Es un material

extremadamente versátil, que puede ser fácil y rápidamente aplicado transformándose en un medio rentable para la construcción.

El hormigón proyectado es una forma eficiente de colocación de hormigón y posee excelente adherencia a múltiples sustratos, incluyendo roca, hormigón, albañilería y acero. Se adapta a una amplia gama de aplicaciones en soporte de suelo, revestimientos y edificación (Figura 1.3).

Las principales ventajas del hormigón proyectado sobre el hormigón moldeado son:

- La colocación y compactación se efectúan en una sola etapa.
- Los moldajes generalmente no son necesarios.
- Permite un rápido proceso de colocación y puesta en servicio.
- En obras de sostenimiento o tunelería permite acortar los ciclos de trabajo.

Tras la aplicación y después de un período inicial de fraguado y de rigidización, el hormigón proyectado proporciona un soporte pasivo temprano al terreno. A medida que el shotcrete endurece y gana resistencia, deformaciones subsecuentes generan una significativa mayor resistencia ya que el hormigón proyectado se vuelve también más rígido.

El hormigón proyectado, correctamente diseñado y aplicado, permanece en su lugar sin hundimiento inclusive en paredes verticales o aplicaciones sobre cabeza. Es muy adecuado en áreas de acceso limitado, usando equipos pequeños, móviles y portables. El hormigón proyectado puede ser aplicado a través de equipos operados remotamente o por pitoneros.

Los equipos remotos (telecomandados) son usados generalmente en aplicaciones subterráneas, lo que permite una operación segura manteniendo alejado al operador del sector sin fortificar. Estas ventajas han dado lugar a que el hormigón proyectado sea usado en un sin número de aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación, agrupadas en áreas generales de aplicación.



Figura 1.3 Shotcrete sobre roca.



## 1.4.2 Tunelería

En tunelería, el hormigón proyectado puede ser usado como revestimiento final o como soporte temporal. En revestimientos finales el hormigón proyectado puede encontrarse en muchos proyectos usado en combinación con pernos de anclaje, cables, hormigón con fibras y marcos de acero (donde se requiera un soporte adicional). Los espesores del hormigón proyectado varían desde 50 mm hasta 500 mm, pudiendo ser aplicados en múltiples capas.



Figura 1.4 Shotcrete en Túnel.

El hormigón proyectado aplicado como soporte temporal es diseñado para proporcionar un soporte estructural temprano. A continuación puede ir seguido de una segunda capa que entrega el soporte permanente. El revestimiento permanente puede ser: hormigón proyectado, dovelas prefabricadas de hormigón u hormigón moldeado in situ.

La tecnología del hormigón proyectado ha desarrollado y mejorado los sistemas de impermeabilización y se ha convertido en un importante método de soporte para la construcción subterránea. Se puede aplicar también delgados revestimientos de hormigón proyectado sin refuerzo para alisar la superficie de la roca y, por lo tanto, reducir la resistencia al flujo de aire.

## 1.4.3 Cavernas

En algunos países se ha hecho común la construcción de cavernas subterráneas para almacenar productos a granel (productos o materias primas) y materiales como petróleo, gas, aguas residuales y desechos nucleares, las que han sido construidas usando un revestimiento permanente de hormigón proyectado (Figura 1.5a y 1.5b).

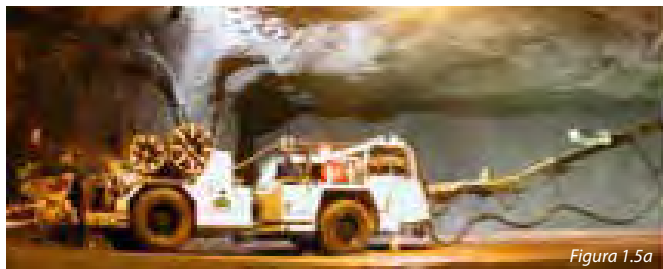


Figura 1.5a



Figura 1.5b

Figura 1.5a y 1.5b Cavernas revestidas con hormigón proyectado.

## 1.4.4 Soporte de suelo en minería

Las primeras aplicaciones mecanizadas de hormigón proyectado en minería fueron efectuadas sobre mallas y pernos instalados en áreas de suelos de mala calidad, donde la malla era inadecuada y requería la colaboración de pernos. Sin embargo, desde la década de los noventa, el hormigón proyectado reforzado con fibra (FRS) está reemplazando progresivamente a la malla de acero como principal método de soporte de suelo en la minería subterránea debido a las siguientes razones:

- 1.- El nivel del soporte de suelo logrado con FRS y el post apernado excede en muchos casos significativamente el nivel de soporte logrado con pernos y mallas.
- 2.- Se produce un incremento en la seguridad al no tener la exposición de personas en zonas no fortificadas.
- 3.- Aumenta la velocidad en el desarrollo de la mina al usar hormigón proyectado.
- 4.- Se reduce significativamente la necesidad de rehabilitación del sistema de soporte del suelo.
- 5.- Ha aumentado la disponibilidad de equipos mecanizados para la proyección de hormigón.

Uno de los principales desarrollos que mejoró la eficiencia en el uso de hormigón proyectado como soporte de suelo fue el paso a la proyección en ciclos. Esto significa que el hormigón proyectado es aplicado durante el ciclo de desarrollo, después de la tronadura y antes de la instalación de los pernos de anclaje. De esta manera, el uso de malla no se requiere y los pernos son instalados a través de las capas del hormigón proyectado. Este método resultó en que las planchuelas fueran instaladas en los pernos sobre las capas de hormigón proyectado, proporcionando una óptima conexión entre el hormigón proyectado y el sustrato.

La instalación del hormigón proyectado durante el desarrollo del ciclo de fortificación exige que el hormigón proyectado logre resistencias a edades tempranas, lo antes posible después de su aplicación, para dar seguridad al personal que está re-ingresando para continuar el desarrollo. La resistencia inicial necesaria tiene que ser establecida por un ingeniero especialista en cada sitio, pero generalmente se encuentra cerca

de 1.0 MPa. En la sección 11.4 se describe los métodos de ensayo, los que requieren un profesional técnicamente calificado y certificado para realizar las mediciones e interpretación correcta de los resultados de los ensayos.

Otro desarrollo que ha mejorado el desempeño del hormigón proyectado en el soporte al suelo y roca es el "hydro-scaling". El hydro-scaling es un lavado con agua a alta presión (entre 3000 a 6000 psi) que ha permitido una mejora en la adherencia del hormigón proyectado con el sustrato de hasta un 300% en algunas aplicaciones. En la mayoría de los casos no existe necesidad del jumbo de perforación para realizar la limpieza de los sectores con mala calidad de suelo. Más detalles sobre el hydro-scaling se encuentran en la sección 9 de esta guía.

Se puede mejorar el desempeño de las capas de hormigón proyectado con un aumento de los espesores de las capas aplicadas y/o con un incremento de la dosis de fibra. Por lo tanto, un mismo sistema de aplicación puede hacer frente a una serie de diferentes requisitos de diseño.

En zonas sísmicamente activas en algunas minas se está instalando malla sobre la capa final de hormigón proyectado para proporcionar un soporte adicional ya que la malla sin revestir tiene una elevada ductilidad respecto al revestimiento. Hoy en día, en las faenas subterráneas de la gran minería y obras civiles en Chile, se utiliza una combinación de hormigón proyectado, fibras, mallas y pernos de anclaje. (Figuras 1.6 y 1.7)



Figura 1.6 Shotcrete sobre perno y malla.



Figura 1.7 Shotcrete sobre marco y malla.

### 1.4.5 Edificación

El hormigón proyectado tiene una larga historia de aplicación en la construcción de edificios fuera de Chile. Ejemplo son los muros estructurales en subterráneos. El hormigón proyectado también ha sido usado como una alternativa para construir y moldear paneles tilt-up y en silos, existiendo vasta experiencia de estas aplicaciones en USA y Australia.

### 1.4.6 Excavaciones para subterráneos y estacionamientos

El hormigón proyectado juega un papel muy importante en el soporte de excavaciones o cuando se requieren cortes verticales. Junto con los pernos de anclaje y/o pilotes excavados se logra avanzar con los muros a medida que avanza el proceso de excavación, dejando un muro permanente que puede ser usado estructuralmente

### 1.4.7 Relleno de hundimientos o superficies sobre-excavadas

El hormigón proyectado puede ser usado eficientemente para el relleno de áreas sobre-excavadas o hundimientos. A diferencia de los métodos tradicionales con un moldaje lateral, usando hormigón proyectado no se expone al personal a condiciones peligrosas y además presenta ventajas logísticas de acceso y construcción.

### 1.4.8 Estructuras civiles complejas

El hormigón proyectado es muy eficiente en estructuras que poseen geometrías complejas, incluyendo reducción de sección o secciones curvas.



Figura 1.8 Secciones complejas en Obra Civil.



### 1.4.9 Canales, embalses y aliviaderos

Los embalses y canales pueden ser construidos excavando hasta la forma requerida y luego proyectando hormigón directamente sobre el suelo o roca expuesta. El hormigón proyectado tiene la capacidad de ser colocado, compactado y afinado en un solo paso, si es necesario en casos que se requiera un acceso rápido, variedad de formas o revestimientos muy gruesos, ver Figura 1.9



Figura 1.9 Hormigón proyectado en un canal hidráulico.

### 1.4.10 Estabilización de taludes

El hormigón proyectado es ampliamente usado para la estabilización y protección en suelos y roca. Debido a su alta resistencia al corte y buena adherencia a la roca, el hormigón proyectado fortalece el sustrato, llenando vacíos y grietas y por lo tanto, evitando que la roca suelta se desprenda (Figura 1.10).



Figura 1.10 Estabilización de talud.

### 1.4.11 Piscinas y skatepark

Estas estructuras recreacionales son buenos ejemplos de la diversidad de formas que pueden construirse con hormigón proyectado. Estas estructuras son construidas excavando acorde a la forma requerida y reforzando según sea necesario con proyección de hormigón (Figura 1.11). Las construcciones con este método son económicas, durables y resistentes.



Figura 1.11 Skateparks con hormigón proyectado.

### 1.4.12 Refractarios

Se pueden revestir o reparar hornos de todo tipo con mezclas especiales de hormigón proyectado que contiene materiales como cementos con alto contenido de aluminato y ladrillos refractarios triturados, los que poseen excelentes propiedades refractarias. Una de las principales ventajas del hormigón proyectado refractario es que puede ser colocado rápidamente en altos volúmenes en áreas poco accesibles, por ejemplo una chimenea elevada o zonas remotas de un horno.

### 1.4.13 Reparación, restauración y reforzamiento

El hormigón proyectado es usado ampliamente en la rehabilitación de estructuras dañadas. Típicas aplicaciones son la reparación de hormigón deteriorado por la corrosión o el fuego. Reparación y restauración tienen lugar después que las zonas afectadas han sido debidamente identificadas y preparadas. Estructuras típicas que se reparan usando hormigón proyectado son puentes, represas, torres, puertos, edificios y estructuras de acero. Las estructuras de hormigón pueden ser reforzadas con hormigón proyectado, por ejemplo, donde la construcción original haya dejado nidos. El hormigón proyectado puede ser también usado cuando un elemento estructural necesita aumentar su tamaño con el propósito de incrementar la capacidad de carga. Dentro de los elementos estructurales que pueden ser reforzados por este medio están vigas, columnas, losas, muros de albañilería, tanques y tuberías.

### 1.4.14 Protección contra el fuego

El uso del hormigón proyectado como material para la protección contra el fuego es común, y puede ser una excelente solución especialmente en plantas químicas y refinarias. Este proceso puede incluir el revestimiento de estructuras de acero o un incremento en los espesores del hormigón de recubrimiento. Por otra parte, el hormigón proyectado puede ser diseñado incorporando micro-fibras sintéticas para minimizar el “desconchamiento” bajo condiciones de calor extremo (“spalling”). Las altas temperaturas derriten estas microfibras permitiendo que el vapor de agua viaje a través de los vacíos que quedan y se disipe en la superficie, por ende, reduciendo la presión interna y el “desconchamiento” posterior.

### 1.4.15 Acabados decorativos

El hormigón proyectado es muy adecuado para generar formas libres con un acabado que puede ser realizado en el mismo sitio. Se pueden construir superficies suaves, cantos afilados y otros detalles pero en general requieren de un trabajo manual delicado (Figura 1.12). Un ejemplo de esto son las terminaciones con una apariencia natural, especialmente imitando roca.



Figura 1.12 Acabados decorativos con shotcrete.

### 1.4.16 Estructuras contra explosiones

El hormigón proyectado ha sido usado por la industria militar para construir hangares e instalaciones a prueba de bombas. Otras organizaciones han usado materiales especiales en el hormigón proyectado para construir estructuras resistentes a explosiones, particularmente en zonas críticas de seguridad de edificios en áreas peligrosas como refinerías de petróleo y gas.

## 1.5 Historia



Figura 1.13 Carl Ethan Akeley inventor de la máquina para shotcrete.

El primer hito en la historia del hormigón proyectado ocurrió en 1907 con la máquina inventada por Carl Ethan Akeley en Estados Unidos. Esta máquina permitía que materiales secos fueran aplicados neumáticamente agregando agua en la salida.

En 1910, se desarrolló y comenzó a utilizar una pistola de cemento con doble cámara, basada en el diseño de Akeley. El concepto de "Gunita" consistía esencialmente en un mortero usado en Estados Unidos en los años veinte como protección contra el fuego en piques mineros. A comienzo de los años treinta, nació el término general de "Shotcrete" (Hormigón Proyectado), difundido por el "American Railway Engineering Association" (Asociación Americana de Ingenieros de Ferrocarriles), para describir el proceso de "gunitado". En 1966, el ACI (Instituto Americano del Hormigón) adoptó el término "Shotcrete" para todas las aplicaciones neumáticas de mortero y hormigón incluyendo la vía húmeda y seca<sup>1</sup>.

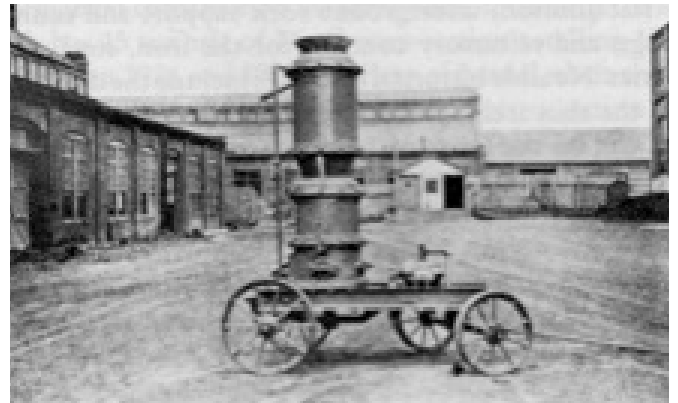


Figura 1.14a Equipo de shotcrete de 1907 utilizada para aplicar revestimientos en el museo de Chicago, USA.



Figura 1.15b Equipo de shotcrete de 1920.

La Unión Europea usó para el mismo material la terminología de "Sprayed Concrete" (Hormigón Proyectado). En los años cuarenta se introdujo el uso de agregado grueso de 10mm dentro de las mezclas de hormigón proyectado. El hormigón proyectado vía húmeda comenzó a usarse desde 1955. A finales de los años sesenta se introdujeron los equipos operados en forma remota. Las primeras fibras metálicas fueron usadas en el año 1971 en Norte América y en 1977 los Noruegos comenzaron a utilizar la fibra metálica y los equipos remotos en gran escala.



Figura 1.16 Faena de proyección de Shotcrete cercano a 1930

El primer equipo de hormigón proyectado que se tenga noción de arribo a Chile fue en la División El Teniente de CODELCO, cercano a la localidad de Rancagua, VI Región. El primer equipo introducido fue de proyección para vía seca a mediados de los años 70, posteriormente esta técnica de proyección fue llevada en los 80 a la División El Salvador. (ver Figura 1.17)



Figura 1.17 Antiguo equipo de shotcrete, antiguas instalaciones de la División El Teniente de CODELCO en Coya.

En la actualidad el desarrollo de esta tecnología ha permitido la introducción en las obras civiles de nuevos equipos, procesos y materiales, siendo el desarrollo de las líneas del Metro de Santiago las que han permitido este cambio tecnológico en Chile a gran escala.

Como resumen se puede señalar el avance de la construcción del Metro de Santiago y el desarrollo del hormigón proyectado:

- Línea 1 (1970 - 80) y línea 2 (1980 - 90): excavaciones a cielo abierto (talud y entibación). Ocupación de grandes terrenos en vías principales.
- Extensiones línea 2 y línea 5 (1990 -2005): construcción de túnel con Método Austriaco (NATM) principalmente shotcrete vía seca y manual.
- Extensiones Línea 4 y futuras línea 3 y línea 6: shotcrete vía húmeda con la introducción de equipos robotizados de alto rendimiento.

Las siguientes imágenes reflejan el avance tecnológico en la construcción del Metro de Santiago, debido a las nuevas técnicas de construcción de túneles y el uso del shotcrete como principal material constructivo estructural y de revestimiento.



Figura 1.18 Tramo línea 1 Metro de Santiago, cubierta sector Holanda, Providencia (1970-80).



Figura 1.19 Tramo Línea 1 Metro de Santiago, sección Evaristo Lillo, Metro Estación Escuela Militar, Las Condes, (1970-80).



Figura 1.20 Tramo Línea 2 Metro de Santiago, estación Cerro Blanco, Recoleta, 2003.



Figura 1.21 Pique de acceso a construcción de túneles y galerías Metro de Santiago, 2003.



# 2

CAPÍTULO

## Consideraciones de Diseño

El enfoque general para el diseño de estructuras de hormigón proyectado se asemeja al utilizado para estructuras de hormigón convencional y toma en consideración aspectos de estabilidad, resistencia, desempeño en condiciones de servicio, durabilidad, resistencia al fuego, impermeabilidad y otros requisitos de diseño.

### 2.1 Consideraciones de diseño para estructuras de hormigón proyectado

#### 2.1.1 Diseño por condiciones de estabilidad

El diseño de estructuras de hormigón proyectado por condiciones de estabilidad debe considerar todos los posibles movimientos de la estructura como un cuerpo rígido, incluyendo volcamiento, levantamiento, pandeo y deslizamiento. El volcamiento es relevante para estructuras de hormigón proyectado auto soportantes (por ej. silos en altura). El levantamiento o flotación es relevante para estructuras enterradas que están sujetas a una presión hidrostática por el exterior (por ej. piscinas vacías). El deslizamiento es importante principalmente para estructuras de hormigón proyectado sometidas a una componente de carga horizontal. Algunas estructuras pueden estar sometidas a una combinación de las situaciones anteriores como es el caso de los muros de contención que están expuestos a volcamiento y deslizamiento.

#### 2.1.2 Diseño por condiciones de resistencia

El uso previsto del hormigón proyectado determinará los requisitos de desempeño que este material debe alcanzar. Este puede variar desde un rol netamente estructural hasta aplicaciones no resistentes como sería el caso de una capa de sellado superficial o un acabado arquitectónico (estético). Esta cláusula cubre el diseño por condiciones de resistencia de hormigón proyectado con responsabilidad estructural.

Debemos estar conscientes que las interacciones del hormigón proyectado con las cargas y los materiales que soporta pueden ser muy complejas y en muchos casos no es posible en la práctica modelarlas o analizarlas en forma satisfactoria. Por esta razón, se han desarrollado diversos métodos analíticos simplificados o enfoques empíricos para diseñar el hormigón proyectado bajo consideraciones de resistencia. Sin embargo, el objetivo común del diseño es lograr una adecuada resistencia

frente a las cargas que supere las solicitaciones impuestas con un margen de seguridad establecida.

Los dos enfoques para el diseño por condiciones de resistencia son: el analítico y el empírico. El enfoque analítico incluye una racionalización de las acciones que potencialmente actuarán sobre el hormigón y de la resistencia del sistema estructural a dichas cargas. Es posible usar tanto un enfoque determinista como uno probabilístico para la estimación de las solicitaciones y de la resistencia. El enfoque empírico implica el uso de un cuerpo documentado de experiencias anteriores que sea relevante para la aplicación específica y las condiciones imperantes del proyecto y derivar a partir de este conocimiento un sistema estructural satisfactorio.

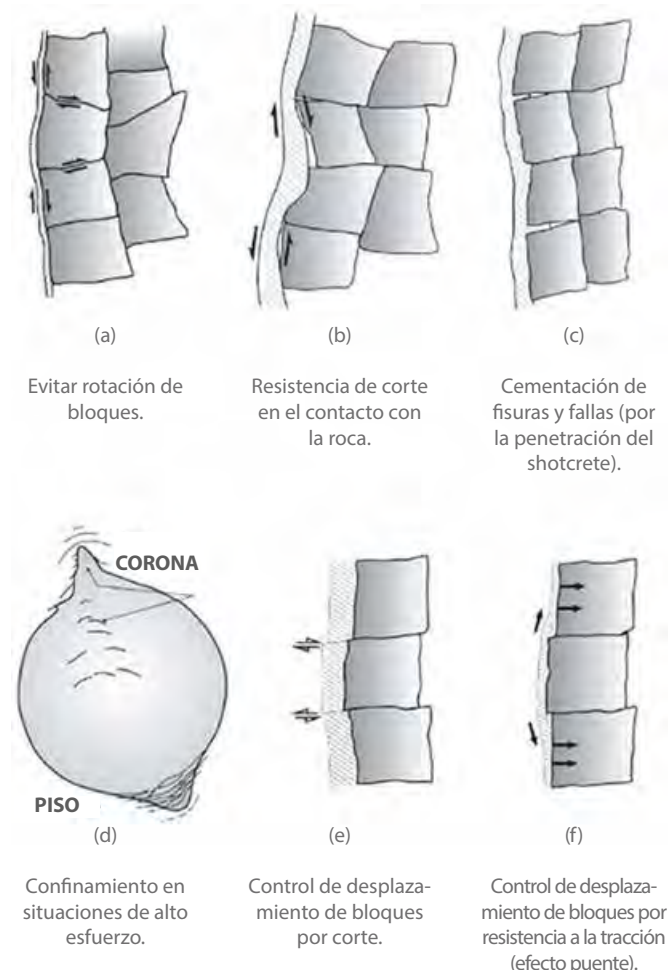


Figura 2.1 Presentación mecanismos de soporte del macizo. Stacey (2001), Alexandre Gomes 2013.



En aplicaciones donde existe una fuerte interacción entre el hormigón proyectado y el terreno, debido al complejo comportamiento estructural y la potencialmente elevada variabilidad de los parámetros de diseño, es una buena práctica monitorear el desempeño de un sistema estructural de hormigón proyectado hasta confirmar que se ha obtenido un comportamiento satisfactorio.

Cuando se requiere adherencia al sustrato como parte de un sistema estructural, la pérdida potencial de adherencia se puede reducir con una adecuada preparación del sustrato y mediante la limitación de la retracción y de la fluencia lenta propia del hormigón. En general no se recomienda depender de la adherencia entre el hormigón y el sustrato para asegurar la capacidad estructural a largo plazo. Se puede generar una conexión a largo plazo entre el revestimiento de hormigón y el sustrato en forma independiente a través del uso de sistemas de anclaje.

No podemos dejar de enfatizar que cuando el hormigón proyectado tenga un rol estructural es esencial la participación de un ingeniero competente y calificado, con experiencia en este tipo de proyectos, para desarrollar el diseño estructural.

Para el diseño estructural en aplicaciones de obras civiles, se puede utilizar en los cálculos los principios generales de diseño por resistencia o estado límite último, por ejemplo de ACI 318, en el diseño de estructuras compuestas principalmente de hormigón proyectado simple u hormigón proyectado reforzado con barras o mallas convencionales. Cuando se utilizan las fibras como refuerzo, se recomienda un análisis que incorpore las resistencias residuales post agrietamiento para los niveles esperados de deflexión.

Si se deben considerar deformaciones importantes en el diseño para tomar en cuenta eventos extremos, se recomienda que la tenacidad del FRS se considere para anchos de fisura grandes (mayores a 2 mm). Los datos de comportamiento para el FRS se obtienen a partir de ensayos como las que se describen en el capítulo 11, correspondiente a los ensayos en paneles y vigas para la estimación de la absorción de energía y la resistencia residual.

### 2.1.3 Diseño por condiciones de servicio

El funcionamiento en condiciones de servicio describe la capacidad de una estructura para seguir siendo adecuada para una finalidad prevista durante toda su vida de diseño. En conjunto con las consideraciones de resistencia a las cargas, el diseño de estructuras de hormigón proyectado puede requerir satisfacer ciertas condiciones de servicio, tales como límites en las deflexiones y en el ancho de grietas. Otros criterios de servicio comúnmente aplicados a estructuras de hormigón proyectado incluyen: estanqueidad, deformación por fluencia, apariencia, acabado superficial y resistencia a la abrasión.

Los límites para las deflexiones y los anchos de grieta en el diseño por condiciones de servicio (diseño por tensiones

admisibles) son generalmente mucho más pequeños que los considerados para los métodos de diseño por resistencia. Los anchos de fisura aceptables, por ejemplo, se toman generalmente por debajo de 0.3 mm en ambientes no agresivos.

### 2.1.4 Diseño por resistencia al fuego

Algunas aplicaciones de hormigón proyectado pueden incluir requisitos establecidos en el Código de Construcción de cada país, o por el mandante, para lograr una determinada resistencia al fuego durante un período mínimo de tiempo. Este requisito generalmente toma la forma de una limitación a la pérdida de resistencia, a la pérdida de capacidad de funcionamiento u operación o a la transmisión de calor y/o humo.

### 2.1.5 Diseño por condiciones de durabilidad

La durabilidad describe la capacidad de una estructura para resistir a las condiciones de exposición medioambientales que puedan ocurrir durante su vida proyectada sin la necesidad de un mantenimiento excesivo. Estas condiciones de exposición medioambientales pueden incluir: ataque químico a la matriz de hormigón y la corrosión de la armadura.

Los requisitos de durabilidad para la matriz de hormigón se satisfacen mediante el control del diseño de la mezcla a través de medidas tales como limitar la máxima relación a/c, la mínima cantidad de cemento o la máxima permeabilidad aceptable. Los requisitos de durabilidad para el acero de refuerzo son normalmente satisfechos mediante la limitación del ancho de las fisuras en servicio a 0.3 mm y la garantía de que la matriz de hormigón cumpla con los requisitos y las características especificadas para la categoría de exposición adecuada. Los anchos máximos aceptables de fisura para el hormigón proyectado reforzado con fibra sintética pueden ser mucho más grandes que el usado para el refuerzo de acero.

### 2.1.6 Diseño por otros requerimientos

Algunas aplicaciones pueden requerir la consideración de otros criterios no incluidos en las categorías anteriores, tales como requisitos operacionales y medioambientales. Ejemplos de esto son la construcción en lugares remotos, restricciones en el horario de trabajo o condiciones climáticas extremas.

### 2.1.7 Consideraciones adicionales para la matriz de hormigón proyectado

Otros criterios de diseño menos usados pueden ser importantes en una aplicación determinada, entre ellos: densidad, módulo de elasticidad, resistencia a la abrasión y al fuego.

Se debe prestar atención al hecho de que todas las propiedades de la matriz del hormigón proyectado son interdependientes y ciertos requisitos de desempeño pueden ser incompatibles. Por ejemplo, una baja densidad con alta resistencia, o un alto contenido de cemento con una baja retracción.



## 2.2 Consideraciones de diseño para el refuerzo

### 2.2.1 Generalidades

Hay tres enfoques para considerar el refuerzo usado en el hormigón proyectado estructural:

- Sin refuerzo.
- Refuerzo convencional con malla, barras o marcos.
- Refuerzo con fibra.

### 2.2.2 Hormigón proyectado sin refuerzo

En aplicaciones que implican solicitaciones exclusivamente de compresión, o sin cargas solicitantes significativas, puede ser apropiado evitar el uso de refuerzo. Tales sistemas estructurales exhibirán muy baja resistencia a la tracción y muy baja ductilidad, por lo tanto, se debe evitar el desarrollo de solicitaciones por tracción en la estructura.

### 2.2.3 Refuerzo convencional

El refuerzo convencional comprende elementos continuos tales como barras de acero, mallas de barras, mallas de alambre electrosoldado, cables de postensado y otros materiales tales como barras o mallas de compuestos plásticos reforzados con fibra. Si se logra un efectivo encapsulamiento de las barras, mallas u otros elementos, logrando que el hormigón proyectado embeba a la armadura con un hormigón de calidad adecuada, los elementos de hormigón proyectado convencionalmente reforzados pueden ser diseñados de acuerdo con las normas de diseño en hormigón armado conocidas, como ACI 318 o NCh 430.

Para garantizar y lograr el efectivo encapsulado, se requiere de un detallamiento y una fijación del refuerzo, marcos reticulados, mallas, etc, que sea apropiado considerando las condiciones de aplicación del hormigón (hormigón aplicado con presión y a alta velocidad contra el refuerzo) y además una correcta técnica de aplicación del hormigón. Se recomienda disponer siempre en el proyecto de operadores y/o pitoneros certificados bajo los estándares recomendados por ACI 506 para shotcrete manual y EFNARC para operadores con equipos robotizados.

Se recomienda que la separación mínima de las barras sea de 100 mm y que los empalmes estén escalonados para que la armadura pueda ser envuelta y encapsulada de forma efectiva durante la proyección.

El ACI 506R recomienda que las barras traslapadas estén separadas por una distancia de al menos tres diámetros de la barra de mayor diámetro. En Australia la convención es que la distancia mínima entre los pares de barras traslapadas es tres veces el tamaño máximo del árido. La incorporación de más de una capa de refuerzo por aplicación de hormigón proyectado fresco puede hacer que sea difícil de lograr el encapsulamiento efectivo sin una debida preparación, aplicación y diseño del hormigón proyectado, Figura 2.2., Figura 2.3 y Figura 2.4.



Figura 2.2 Shotcrete a través de varias secciones de armaduras en muro.



Figura 2.3 Shotcrete a través de secciones de marcos reticulados estructurales.



Figura 2.4 Testigos que demuestran el mal encapsulado de las barras, parte del proceso de examinación del ACI 506.

Los pernos de anclaje a menudo introducen una carga puntual elevada sobre un revestimiento de hormigón proyectado, la que necesita ser anclada al revestimiento utilizando el refuerzo como parte del conjunto. Estas fuerzas pueden ser distribuidas en el revestimiento más eficazmente si se coloca una placa de dimensiones adecuadas al perno de anclaje o se usa una serie de barras de refuerzo inclinadas (a veces llamadas "spider" en el extranjero) en el extremo del perno. Este "spider" siempre debe quedar encapsulada dentro del revestimiento de hormigón proyectado reforzado con fibras.

La placa debe ser externa a la capa estructural de hormigón proyectado para que sea eficaz y puede ser cubierta posteriormente con hormigón proyectado no estructural.

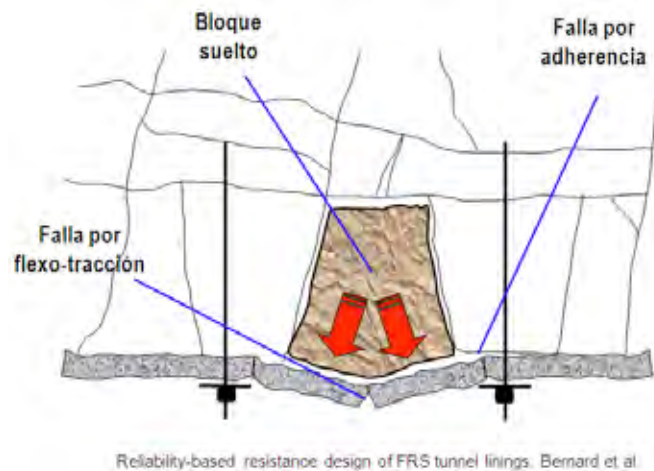


Figura 2.5 Modelo básico de soporte con pernos.

Las vigas o marcos utilizados en la construcción subterránea a menudo incluyen barras de refuerzo de diámetro superior a 16 mm. Sin embargo, estas vigas están especialmente diseñadas para permitir un completo encapsulado con el hormigón proyectado, por lo que solo dependerá del operador completar en forma efectiva esta operación.

### 2.2.4 Fibra de refuerzo

La fibra de refuerzo comprende elementos discretos cortos, distribuidos uniformemente a través de la masa del hormigón proyectado (Figura 2.6). Las fibras individuales se fabrican típicamente de acero o de polímeros, aunque en aplicaciones especializadas se han utilizado fibras de vidrio resistente a los álcalis o celulosa. Las fibras pueden ser introducidas al hormigón proyectado por razones distintas al refuerzo estructural, tales como el control del rebote y de la fisuración por retracción plástica y para mejorar la resistencia al fuego.

Cabe mencionar que uno de los argumentos de los diseñadores que se han resistido al uso de la fibra pasa por la dispersión uniforme de las fibras en la masa de hormigón. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que un buen diseño de mezcla y un adecuado carguío de este producto permite una homogénea dispersión en la masa.



Figura 2.6 Distribución de la fibra en la matriz de hormigón (imagen gentileza GRACE, B. Vicencio)

Otro aspecto relevante en las aplicaciones en obras civiles, es la combinación entre la dosis de fibra y el espesor del shotcrete como aplicación para alcanzar la absorción de energía requerida, tema que se aborda en profundidad en el capítulo de ensayos.

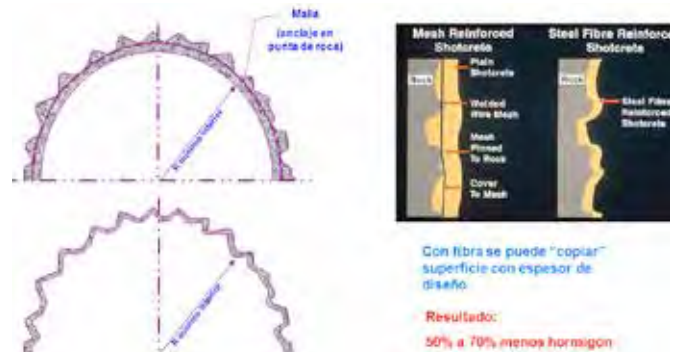


Figura 2.7 Esquema de ventajas en espesor y volumen de una aplicación de shotcrete con fibra v/s shotcrete con malla.

El rol estructural de la fibra de refuerzo en el hormigón proyectado es proporcionar tenacidad (capacidad de carga después del agrietamiento) y no una mayor resistencia a la tracción o a la flexión del hormigón no fisurado. La tenacidad describe la capacidad del hormigón proyectado reforzado con fibras para mantener y potencialmente redistribuir las cargas después de la fisuración. En un diseño determinista, el sistema estructural con hormigón proyectado se diseña de manera idealizada para no agrietarse. Sin embargo, debido a la complejidad y la incertidumbre inherente a algunos sistemas estructurales, especialmente cuando está implicado el soporte del suelo, sigue existiendo la posibilidad de una subestimación de las solicitaciones, por lo que la capacidad de carga después de la fisuración es crucial para mantener la seguridad y capacidad de servicio global del sistema.

La tenacidad se cuantifica en términos de la capacidad de carga o de la absorción de energía post agrietamiento, la que se evalúa a través de vigas o paneles. Las mediciones de la capacidad de carga posterior a la fisuración, en una viga o panel de prueba se utiliza para cuantificar la capacidad del hormigón con fibra agrietado para soportar las solicitaciones de carga.

Existen varias herramientas de diseño geotécnico que sirven como orientación sobre el valor de tenacidad que se debe especificar para aplicaciones en minería u obras civiles subterráneas, tal como se indica en las próximas secciones.

## 2.3 Consideraciones de diseño para aplicaciones en obras civiles subterráneas

### 2.3.1 Cargas aplicadas

Un factor determinante para el diseño de hormigón proyectado es la definición de las cargas que actuarán. Estas se determinan típicamente usando el método desarrollado por Terzaghi<sup>2</sup> para el análisis de cuña o con el uso de programas computacionales especializados basado en un análisis de elementos finitos. En suelo fracturado, la determinación de las cargas se modela a menudo utilizando formas y masas idealizadas de suelo inestable que actúan como una carga distribuida en el revestimiento.

### 2.3.2 Diseño por condiciones de estabilidad

El diseño por condiciones de estabilidad estructural de túneles civiles no suele ser un factor determinante. Sin embargo, si los elementos en un conjunto, o partes de los mismos, están sujetos a inestabilidad debido a volcamiento, levantamiento y deslizamiento, deben ser diseñados considerando estos factores. La estabilidad de una perforación excavada es, sin embargo, la principal preocupación y se aborda en las cláusulas siguientes.

### 2.3.3 Diseño por condiciones de resistencia

La estructura y sus componentes deben ser diseñados para tener una resistencia adecuada. Las solicitaciones se determinan utilizando los códigos de diseño para hormigón convencional armado y/u otros códigos de práctica o guías disponibles para el diseño de hormigón no armado y reforzado con fibras, por ejemplo DBV German Concrete Society<sup>37</sup> o Barrett & McCreath<sup>3</sup>.

Existen diversos documentos que proporcionan una orientación sobre el diseño de revestimientos de hormigón proyectado para diferentes condiciones de terreno. Estos documentos incluyen guías de AFTES<sup>4</sup> e ICE<sup>5</sup> para revestimientos gruesos de hormigón proyectado en terrenos blandos y la guía ACI SP57<sup>6</sup> para revestimientos refractarios. RILEM TC162<sup>7</sup> proporciona cierta ayuda respecto a las propiedades estructurales de FRS, pero los ensayos involucrados rara vez se utilizan. Más información sobre el diseño de revestimiento de hormigón proyectado puede encontrarse en John & Mattle<sup>8</sup>, Hoek et al<sup>9</sup>, BTS<sup>10</sup> y Windsor<sup>11</sup>.

Las mediciones de resistencia deben realizarse según se describe en el capítulo de ensayos, el que incluye: resistencia a la compresión, a la flexión, absorción de energía y resistencia residual.

No se debe depender de la adherencia ente el shotcrete y el sustrato para garantizar el soporte estructural a largo plazo. Se debe especificar los requisitos mínimos para la adherencia cuando el diseño a corto plazo considera el aporte de la adherencia. Para esto se deben realizar pruebas de adherencia como se menciona en el capítulo de ensayos.

### 2.3.4 Diseño considerando parámetros geotécnicos

Un consultor geotécnico o ingeniero especializado debe evaluar la influencia que puedan tener las tensiones medidas o previstas, la estructura, discontinuidades y posibles desplazamientos o deformaciones en el tiempo. El perfil de la excavación y su tamaño pueden afectar la especificación de hormigón proyectado, en su resistencia y espesor. Ejemplos de herramientas de diseño que utilizan datos geotécnicos son:

- Sistema Q (Grimstad & Barton<sup>12</sup>).
- Sistema RMR (Bieniawski<sup>13</sup>).
- Nuevo Sistema Austríaco para la Construcción de Túneles (NATM).

- Método de la curva característica del suelo (Brady and Brown<sup>14</sup>).
- Modelación numérica.

### 2.3.5 Diseño por condiciones de servicio

Las estructuras subterráneas y las partes que la componen deben ser diseñadas con una adecuada capacidad de servicio controlando o limitando las deflexiones, el agrietamiento y las vibraciones.

El diseño por condiciones de servicio también debe considerar el control de los asentamientos subterráneos y de superficie dentro de los límites aceptables según lo especificado en los requisitos de proyecto. Otras condiciones que también pueden ser aplicadas al hormigón proyectado son el acabado de la superficie o requisitos decorativos y de impermeabilización.

### 2.3.6 Diseño por condiciones de durabilidad

La estructura debe ser diseñada para la durabilidad definida por los requisitos del proyecto. La durabilidad puede comprender muchas interacciones complejas de los elementos de la estructura y el entorno en que se encuentra, las que deben ser tratadas en conjunto con un experto con experiencia en el tema.

Los problemas típicos que influyen en el diseño por condiciones de durabilidad son la vida útil especificada (por ejemplo 20, 50 ó 100 años) y la exposición a la atmósfera y el medio ambiente (por ejemplo, la química de las aguas subterráneas, las condiciones de hielo/deshielo, suelo contaminado, corrientes parásitas, etc.) Se recomienda consultar textos especializados y a consultores familiarizados con los problemas de durabilidad y corrosión del refuerzo para desarrollar diseños apropiados cuando se espere que la estructura de hormigón proyectado se encuentre en condiciones de exposición agresivas (como en defensas costeras).

La nueva norma NCh170 incorporará disposiciones específicas respecto a la calificación de los ambientes agresivos y la especificación de las propiedades requeridas del hormigón, especialmente las resistencias mínimas, mínimo contenido de cemento y la permeabilidad del hormigón.

### 2.3.7 Diseño por resistencia al fuego

La estructura y sus componentes deben, si es necesario, estar diseñados para ser resistentes al fuego. En algunos casos será necesario realizar pruebas de fuego para verificar que se alcance el nivel de resistencia al fuego esperado, las que se realizan en sitio o en instalaciones especialmente preparadas como el túnel de pruebas de VS Hagerbach en Suiza.

### 2.3.8 Diseño por otros requerimientos

Los requisitos especiales de un proyecto pueden afectar a las características del hormigón requerido, por lo que este aspecto debe ser considerado en el diseño. Los problemas típicos que pueden surgir en un ambiente subterráneo civil, incluyen pero no se limitan a, las restricciones relativas a los horarios de construcción y disposiciones respecto al apoyo y empotramiento de fijaciones mecánicas y eléctricas.

## 2.4 Consideraciones de diseño para la minería

### 2.4.1 Diseño por condiciones de resistencia y estabilidad

**Parámetros geotécnicos.** La industria minera ha utilizado tradicionalmente métodos empíricos apoyados por alguna forma de clasificación del macizo rocoso para el diseño del sistema de soporte. Los sistemas de clasificación del macizo rocoso se han utilizado para agrupar áreas de características geomecánicas similares, con el fin de proporcionar una guía para abordar el comportamiento respecto a estabilidad y para seleccionar el tipo de apoyo apropiado. Ejemplos de sistemas comúnmente usados son:

- Sistema Q (Grimstad& Barton<sup>12</sup>).
- Sistema RMR (Bieniawski<sup>13</sup>).
- Nuevo sistema Austríaco para la Construcción de Túneles (NATM).
- Método de la curva características del suelo (Brady and Brown<sup>14</sup>).

Los sistemas de clasificación RMR y Q se basan en una clasificación de tres propiedades principales de un macizo rocoso:

- Resistencia de la roca intacta.
- Propiedades de fricción de discontinuidades.
- Geometría de los bloques intactos de roca definidos por las discontinuidades.

El sistema Q de clasificación del macizo rocoso fue desarrollado para el soporte de túnel en roca dura por Barton et al<sup>15</sup> y se basa en una evaluación numérica de la calidad del macizo rocoso con seis parámetros:

- RQD: Denominación de calidad de la roca.
- Jn: Índice de diaclasado (número de familias de discontinuidades).
- Jr: Índice de rugosidad de las discontinuidades.
- Ja: Índice de alteración de las discontinuidades.
- Jw: Factor de reducción por presencia de agua.
- SRF: Factor de reducción por tensiones.

La principal ventaja del sistema de clasificación Q es que es relativamente sensible a variaciones menores en propiedades de las rocas. Las descripciones utilizadas para evaluar la condición de las discontinuidades son relativamente rigurosas y dejan menos margen para la subjetividad, en comparación con otros sistemas de clasificación de macizos rocosos. Una desventaja

del sistema Q es que es relativamente difícil de aplicar para los usuarios sin experiencia (Milne et al<sup>16</sup>).

El uso del sistema Q para el diseño de soportes también ha evolucionado con el tiempo. En particular, Grimstad&Barton<sup>12</sup> ha introducido un gráfico de diseño que toma en consideración el uso de hormigón proyectado reforzado con fibras. Esto se muestra en la Figura 2.11.

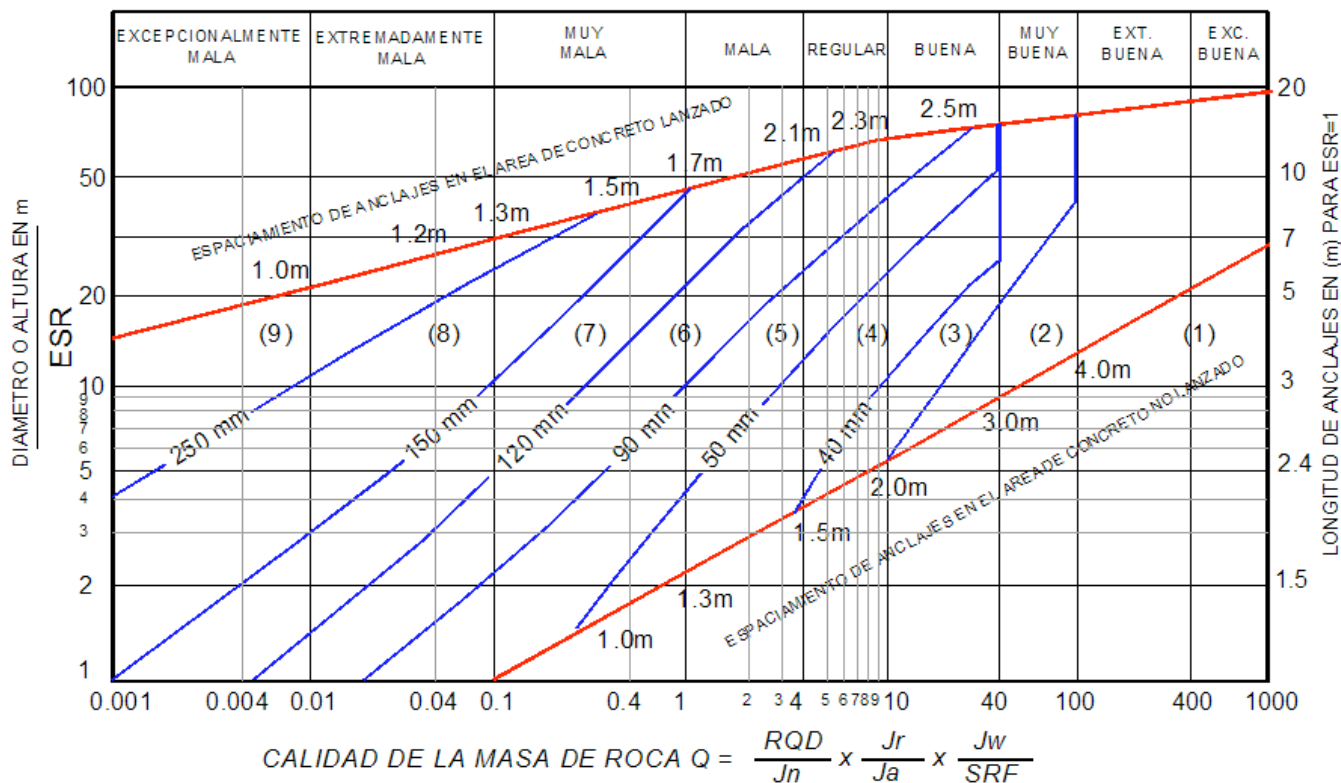
El diseño del soporte con hormigón proyectado en minería tiende a diferir del enfoque de diseño de túneles, debido a que la orientación de la excavación, las condiciones de profundidad y tensiones pueden variar a lo largo de una mina subterránea y durante la vida de operación. Debido a esta variación, se recomienda que un consultor geotécnico o ingeniero con experiencia en el tema evalúe la influencia de cualquier tensión medida o estimada, de la estructura, las características de las discontinuidades y desplazamientos o deformaciones anticipadas en el hormigón proyectado. El perfil del túnel y su tamaño también pueden afectar la especificación del hormigón proyectado, en su resistencia o espesor. Los requisitos para el hormigón proyectado o para otros métodos de control de superficies deben ser determinados por un ingeniero geotécnico, ingeniero del área de mecánica de rocas o con una experiencia similar.

**Preparación del sustrato.** El desempeño del hormigón proyectado puede ser afectado significativamente por la calidad de la preparación del sustrato. Consideraciones generales son la limpieza de la superficie, el flujo de agua, el material de relleno de discontinuidades, etc. Véase el capítulo 9 sobre preparación del sustrato.

### Interacción con otros elementos de soporte del suelo.

En el diseño del hormigón proyectado se debe considerar la posible interacción con otros elementos de apoyo tales como pernos de anclajes, malla, barras, corchetes, arcos y placas. Estos requisitos debieran ser examinados y especificados por un consultor geotécnico o ingeniero con experiencia en esta área.





CATEGORÍAS DE REFUERZO

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Sin sostenimiento.</li> <li>(2) Pernos colocados en forma esporádica.</li> <li>(3) Pernos colocados en forma sistemática.</li> <li>(4) Perno colocados en forma sistemática + shotcrete no reforzado (40 - 100 mm).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(5) Perno + shotcrete reforzado con fibra (50 - 90 mm).</li> <li>(6) Perno + shotcrete reforzado con fibra (90 - 120 mm).</li> <li>(7) Perno + shotcrete reforzado con fibra (120 - 150 mm).</li> <li>(8) Perno + shotcrete reforzado con fibra (&gt; 150 mm) + marcos.</li> <li>(9) Revestimiento de hormigón armado colado in situ.</li> </ul> |
|---|---|

Figura 2.10 Categorías de soporte basada en el índice Q (tomado de Grimstad Barton<sup>15</sup>).

### 2.4.2 Diseño por condiciones de servicio

**Flujos de agua subterránea.** Los flujos de agua subterránea excesivos pueden afectar la unión del hormigón proyectado con el sustrato y el comportamiento último debido a la presión excesiva del agua que se acumula detrás del hormigón. En el capítulo 5 sobre diseño de mezclas, se entregan recomendaciones acerca de las técnicas sugeridas para mitigar los riesgos asociados con el agua subterránea.

**Requerimientos de terminación de las superficies.** Puede ser necesario un acabado liso por razones estéticas, para reducir la rugosidad de la superficie y la abrasión o para mejorar la ventilación y mejorar el flujo de algún fluido. Los acabados lisos también se pueden especificar por motivos de seguridad en talleres, estacionamientos, salas o áreas donde los seres humanos o máquinas puedan entrar en contacto con la superficie. Los ejemplos incluyen túneles que requieren revestimientos a prueba de agua o que incorporan membranas en láminas.

### 2.4.3 Diseño por condiciones de durabilidad

**Vida útil de la excavación.** El diseño del hormigón proyectado debe tener en cuenta la longitud de la vida de servicio requerida para el túnel, cámara, eje, pase de minerales u otra excavación.

**Abrasión.** En aplicaciones en las que el hormigón proyectado se somete a desgaste por flujos de roca, se puede requerir mejorar la resistencia a la abrasión y las propiedades resistentes al impacto mediante el uso de hormigón proyectado o de mayor tenacidad o a través de la adición de materiales especiales tales como el corindón (corundum).

**Temperatura y humedad.** Subterráneos, minas y túneles pueden tener ambientes muy secos con altos flujos de aire y elevadas temperaturas los que pueden causar agrietamiento por retracción plástica y/o de secado. Este factor debe ser evaluado en el diseño y debe prestarse especial atención al curado. Véase el capítulo 9 sobre aplicación.

**Fragilidad.** La tenacidad del FRS cambia con la edad y en determinadas circunstancias, en particular para una matriz de cemento muy fuerte y para grandes deflexiones. Bernard<sup>26</sup>. Por ejemplo, la tenacidad obtenida a los 28 días no necesariamente puede ser mantenida a edades posteriores. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta el grado de deformación que podría sufrir un revestimiento de FRS a edades más tardías a la hora de seleccionar el tipo y la tasa de dosificación de fibra que se usa como refuerzo. La solicitud más severa sobre un revestimiento de FRS no necesariamente se encuentra a edades tempranas.

#### 2.4.4 Otros factores de diseño

**Resistencia al fuego.** Generalmente no se considera en las especificaciones del hormigón proyectado para aplicaciones mineras. Es un tema pendiente a falta de una reglamentación más acabada.

**Túnel – perfil y tamaño.** El Perfil del túnel y sus dimensiones pueden afectar a los métodos y equipos de aplicación.

**Tiempo de reingreso.** Si el tiempo de reingreso es crítico para la velocidad de desarrollo el hormigón proyectado puede ser aplicado ‘en ciclos’. El ciclo del hormigón proyectado se define como la aplicación inmediata de hormigón proyectado una vez que la frente ya ha sido perforada, “quemada”, excavada y retirada la marina y recibe una primera capa de shotcrete como revestimiento previo al inicio del nuevo ciclo de perforación (se puede ampliar el ciclo si además se incluyen pernos, mallas, etc.). En el capítulo 4 y el capítulo 5 se pueden encontrar detalles sobre los aditivos y el diseño de la mezcla que influyen en la resistencia temprana y por lo tanto el tiempo de reingreso. En la definición de este tiempo, la principal prioridad es la seguridad de los trabajadores.

**Disponibilidad de materias primas.** La escasez permanente de materias primas (áridos) es un agravante cada año más relevante en la producción de shotcrete y por ende eleva los costos de un proyecto, en un futuro cercano se deberá considerar el uso de materiales de desecho disponible, tales como arenas de relaves o material estéril, siempre que se pueda alcanzar los requisitos de diseño se cumpla con las restricciones de la normativa vigente aplicables. La disponibilidad y variedad de cementos, materiales finos complementarios, aditivos, áridos y arenas pueden afectar al diseño de la mezcla y su desempeño. Véase el capítulo 4 sobre los componentes y en el capítulo 5 sobre diseño de la mezcla. El adecuado almacenamiento y la disponibilidad de las materias primas deben ser considerados, por ejemplo, disponiendo de elementos para el almacenamiento de agregados, cuidando el contenido de humedad y la protección contra el clima, etc.

**Despacho.** El plazo de despacho desde la planta de mezclado de hormigón o de producción con materiales predosificados y la forma de entrega, por ejemplo, vehículo con mezclador o vehículo con agitador de hormigón, pueden afectar la calidad y el desempeño final del hormigón proyectado. Puede ser posible mitigar este problema con un diseño de mezcla y aditivos apropiados (ver el capítulo 4). La interacción con otras actividades debe ser considerada y el uso de las plantas dosificadoras subterráneas puede proporcionar una alternativa adecuada para las plantas de superficie.

**Ensayos.** Al especificar ciertos ensayos en el hormigón proyectado, el usuario debe tener en cuenta el tipo y la frecuencia de las pruebas en relación con la importancia de la faena y la disponibilidad de instalaciones de ensayo debido a limitaciones específicas como la lejanía. Esto puede llevar a quien diseña a adoptar un enfoque más conservador, lo que afectará a las especificaciones de ensayo (ver el capítulo 10). Se deben considerar sistemas de monitoreo permanente para las aberturas o excavaciones que se mantendrán por un plazo extendido y se espera estén sometidas a grandes desplazamientos.



# 3

## CAPÍTULO

### Propiedades del Hormigón Proyectado - Shotcrete

Las propiedades del hormigón proyectado se pueden especificar y medir utilizando los siguientes parámetros.

#### 3.1 Docilidad

La docilidad se mide utilizando el ensayo de asentamiento de cono y corresponde al descenso del hormigón en estado plástico el que se ha colocado en un cono de metal normalizado y después de que el cono de metal ha sido llenado, compactado y levantado verticalmente de acuerdo a las normas correspondientes ASTM C143 o NCh1019. La docilidad es una magnitud que en la práctica normal del hormigón se utiliza como un indicador aproximado de la trabajabilidad. Para hormigón proyectado este parámetro no debe utilizarse como un indicador de la capacidad de bombeo o la capacidad de proyección de una mezcla. El asentamiento de una mezcla es principalmente un indicador de la regularidad y uniformidad en las proporciones de la mezcla entre lotes o despachos. La magnitud absoluta del asentamiento requerido para una mezcla de hormigón proyectado dado no es un indicador confiable de la calidad general o la idoneidad de esa mezcla para ser proyectada (en el capítulo 11 se describe el método de ensayo).

La magnitud del asentamiento requerido para una aplicación de hormigón proyectado en particular dependerá de las características del proyecto. En general, las mezclas de asentamiento más bajas (60 – 100 mm) son más adecuadas para aplicaciones en las que no se utilizan aditivos aceleradores de fraguado y las mezclas con asentamientos mayores (180 - 220 mm) son más adecuadas para aplicaciones en las que si se utiliza un acelerador de fraguado. Si se utilizan aceleradores de fraguado, el asentamiento debe ser optimizado de acuerdo a las necesidades operacionales. Por ejemplo, la docilidad o fluidez puede ser seleccionada para minimizar la presión en la bomba y las pulsaciones en la línea, optimizar la dispersión del acelerante al interior del flujo de hormigón, garantizar la dispersión de las fibras o asegurar que el hormigón se adhiera al sustrato y no deslice o caiga. La adición de fibras puede reducir el asentamiento. Por lo tanto, la pérdida de docilidad que normalmente se producirá como resultado de la adición de fibras no indica necesariamente una reducción en la capacidad global de la mezcla en relación con las características colocación del hormigón proyectado. El asentamiento de una mezcla se verá afectada por la temperatura ambiente, el tiempo transcurrido desde el mezclado, la granulometría de los áridos (especialmente el porcentaje de finos y limo presente en los

materiales) y los aditivos incluidos en la mezcla. La docilidad se puede ajustar para adaptarse a los requisitos operacionales mediante la adición de reductores de agua o superplastificantes sin reducir la resistencia a los 28 días del hormigón proyectado.

#### 3.2 Resistencia a la compresión

La principal propiedad especificada para el hormigón proyectado simple es la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión es la resistencia de un material a una fuerza de aplastamiento aplicada axialmente. La resistencia a la compresión no confinada de hormigón endurecido es uno de los muchos indicadores de la calidad del hormigón.

Esta resistencia debe utilizarse como un indicador de la resistencia a la compresión de una mezcla una vez endurecida y se puede utilizar como una medida indirecta de otras propiedades mecánicas de la mezcla. La resistencia a compresión está solo indirectamente relacionada con otras propiedades, tales como el nivel de compactación, tenacidad, permeabilidad y la durabilidad, y por lo tanto no debe ser tomada como una guía exclusiva de la calidad del hormigón.

Es importante distinguir entre la resistencia a la compresión del hormigón proyectado tal como se suministra antes de la colocación en comparación con su comportamiento una vez colocado. La resistencia de una mezcla puede verse afectada por muchas variables durante el proceso de colocación, tales como la temperatura, la adición de acelerante de fraguado, una proyección y compactación deficiente o un curado inadecuado. La resistencia de diseño de hormigón proyectado debe estar basada en el comportamiento en obra de la mezcla ya proyectada, y los testigos de hormigón extraídos in situ son la medida más apropiada de esta propiedad. Sin embargo, los testigos tomados desde una estructura requieren preparación y posterior reparación de la misma, por lo que los testigos perforados desde un panel de prueba de producción son un sustituto adecuado.

La resistencia a la compresión del hormigón proyectado nunca debe ser determinada por la proyección de hormigón en moldes cilíndricos, ya que causa una excesiva recolección de rebote dentro de los moldes. La resistencia a la compresión del hormigón previo a la colocación se mide mejor con el uso de cilindros que son llenados con hormigón muestreado directamente desde el punto de descarga.

La magnitud de la diferencia de resistencia entre el hormigón moldeado y el hormigón proyectado es un tema que debe ser considerado en el diseño y que normalmente debería determinarse mediante ensayos de pre-construcción. Variaciones excesivas en la relación entre la resistencia a la compresión del hormigón ya proyectado en comparación con las probetas moldeadas (una caída superior al 20 %) puede ser un indicador de impactos adversos en la calidad, por ejemplo: por una técnica de proyección deficiente o condiciones de curado deficiente. Se tolera generalmente una variación del 20% entre un cilindro tomado de la mezcla de hormigón suministrado y un testigo tomado de un panel de ensayo de hormigón proyectado usando la misma mezcla. Esto toma en cuenta la diferencia entre los métodos de ensayo de cilindros y los de testigos. También permite incluir el efecto del acelerante en la mezcla. Por ejemplo, si la especificación requiere una resistencia de 32MPa para la estructura in situ, entonces es recomendable especificar una resistencia en cilindro de 40 MPa para el hormigón suministrado. Del mismo modo, una resistencia especificada del hormigón in situ de 40MPa requeriría una resistencia en probeta cilíndrica de 48 MPa para el hormigón suministrado. La diferencia en la resistencia a la compresión entre el hormigón entregado en obra y el hormigón proyectado será menor cuando no se use un acelerante. La resistencia a la compresión del hormigón proyectado debe ser determinada por extracción de testigos a diferentes edades tomados desde un panel sobre el cual se ha proyectado el hormigón (consulte el capítulo sobre ensayos y métodos de prueba).

No se deben hacer suposiciones acerca de la relación entre la resistencia de los cilindros de hormigón obtenidos de la descarga y los testigos del hormigón ya proyectado. Si se requiere de estas relaciones, se deberían desarrollar específicamente para una faena determinada realizando mediciones de ambas resistencias hasta obtener una correlación. La resistencia de los testigos extraídos in situ representan la resistencia del hormigón colocado, sin aplicar ninguna corrección, salvo por el factor de esbeltez del testigo.

La resistencia a la compresión de hormigón proyectado endurecido es altamente dependiente de la relación agua/cemento. La relación agua/cemento para hormigón proyectado por vía húmeda normalmente oscila entre 0.4 para la aplicación civil y subterránea hasta un 0.65 para piscinas. Valores en el orden de 0.35 se pueden conseguir fácilmente mediante el uso de reductores de agua de alto rango. La relación de contenido de agua/cemento está dentro del rango de 0.3 a 0.5 para hormigón proyectado en seco, pero puede variar ampliamente debido a la incertidumbre en el control del agua por parte del pitonero. Para hormigón proyectado de mezcla húmeda, la resistencia a la compresión (sin acelerador) puede oscilar entre 20 y 70 MPa a los 28 días. Los proyectos de infraestructura normalmente especifican una resistencia mínima sobre 30MPa a los 28 días (ver en la tabla siguiente las resistencias típicas en diversas aplicaciones, recomendadas por la American Shotcrete Association de Australia).

Tabla 3.1 Resistencias recomendadas por aplicaciones (medidas en cilindros a los 28d)

Aplicación	Rango de resistencia
Piscinas	25-30 MPa
Subterráneos y Bodegas	30-40 MPa
Revestimiento de Túnel	30-50 MPa

### 3.3 Resistencia temprana

El shotcrete para soporte de rocas o suelos especialmente en túneles debe alcanzar una resistencia mínima a una edad temprana, a menudo dentro de las primeras horas después de la proyección. La resistencia a edad temprana es la resistencia del hormigón proyectado requerida en un momento anterior a los 28 días especificados para hormigones convencionales. Los testigos y cilindros son a menudo inadecuados para la tarea de determinar la resistencia a una edad temprana. Por esta razón existen varios métodos indirectos que se han ideado con el fin de probar esta resistencia a edad temprana. Un ejemplo es el penetrómetro que se utiliza empujando una sonda o aguja en una superficie de ensayo recién proyectada que se encuentra cerca, pero no directamente en, el sector que no cuenta con soporte. Se debe tener el cuidado de calibrar las lecturas del penetrómetro con valores reales de resistencia a la compresión (los métodos disponibles para pruebas indirectas para la estimación de la resistencia a la compresión a edad temprana se describen en el capítulo 11).

### 3.4 Resistencia a la flexión

El shotcrete está solicitado en flexión en la mayoría de sus aplicaciones, por ejemplo estabilizaciones de talud, recubrimiento de túneles o piscinas. La resistencia a la flexión es la resistencia de un elemento sometido a momentos flectores. Si el comportamiento a flexión es importante es más apropiado medir directamente la resistencia a la flexión del hormigón proyectado en lugar de estimar este valor basado en relaciones entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión.

La resistencia a la flexión de la matriz de hormigón también se conoce como el Módulo de Rotura y corresponde a la tracción teórica máxima que se alcanza en la fibra extrema en tracción de una viga de ensayo bajo carga puntual. Esta tensión se determina considerando una distribución elástica de la tensión a través de la sección transversal de la viga.

La magnitud de la resistencia a la flexión del hormigón proyectado es por lo general alrededor de 7 a 15% de la resistencia a la compresión para la mezcla tanto en húmedo como en seco y puede aumentar con la edad. La resistencia a la flexión se mide típicamente usando una viga cargada en los tercios y se basa en la carga alcanzada para la formación de la primera fisura (véase el Capítulo 11). La capacidad de carga, más allá de la primera fisura, se asocia con la contribución el refuerzo y puede medirse utilizando ensayos de tenacidad. Si se requiere de tenacidad debido a requisitos de soporte de carga post fisuración, puede que no sea necesario pedir la resistencia a la flexión.

### 3.5 Tenacidad

La tenacidad es una medida de la resistencia después de la fisuración del hormigón proyectado reforzado con fibra. Es una propiedad relevante cuando se espera que la estructura esté sometida a deformaciones o desplazamiento importantes después del agrietamiento. La tenacidad puede evaluarse en términos de la capacidad de carga residual o capacidad de absorción de energía, normalmente entre el inicio de la carga y una deflexión especificada en un ensayo de viga o panel y se determina como el área bajo la curva carga/deflexión para una probeta. Es una propiedad que se ve afectada principalmente por el contenido y tipo de fibra, pero también puede ser fuertemente influenciada por la resistencia y la calidad de la matriz de hormigón proyectado. Las unidades de medida son Joules (Nm o KNmm).

En Australia y América del Norte la prueba del panel redondo, como se describe en la norma ASTM C1550<sup>17</sup>, se ha convertido en el método de prueba más común para medir la tenacidad del hormigón proyectado reforzado con fibras. En otras partes del mundo, especialmente en Europa occidental, se utilizan principalmente la Norma Europea EN 14488-3<sup>18</sup> para vigas o la norma EN 14488-5 para paneles (estos ensayos se conocían con anterioridad como los ensayos de vigas y de paneles de EFNARC). Existe evidencia de correlaciones útiles entre los valores de tenacidad y absorción de energía usando los diversos métodos de ensayo, siempre que el espesor de las probetas sea el mismo (Bernard<sup>19</sup>).

El sistema de calidad de la roca "Q" de uso general para la determinación empírica de soporte en roca se actualizó en 2002 para incluir valores de tenacidad, según ensayos en panel EN 14488-5 para hormigón proyectado reforzado con fibras utilizados en los revestimientos (Grimstad y Barton<sup>12</sup>).

Los valores de tenacidad necesarios para un proyecto dependen de los requisitos de la aplicación de que se trate, y los valores y método de ensayo adecuado deben ser especificados por un ingeniero o experto geomecánico.

En aplicaciones de minería, donde no solo se permiten deformaciones y anchos de fisura importantes, sino que a veces es visto como un indicador de la conveniencia económica del sistema de soporte, es una práctica común el especificar el comportamiento en términos de resistencia a partir de pruebas de panel. Por el contrario, en aplicaciones de ingeniería civil, debido a la necesidad de mantener los anchos de fisura en un mínimo para asegurar durabilidad, los valores de las tensiones de diseño se definen para los anchos de fisuración relativamente bajos de las pruebas de absorción en vigas. Los valores mínimos típicos especificados en aplicaciones de minería se listan en la tabla 3.2 y para aplicaciones civiles de la tabla 3.3, ambas experiencias recomendadas por la ASA (American Shotcrete Association) y la Asociación de Shotcrete de Australia.

Tabla 3.2 Tenacidad recomendada en minería

Tipo de Soporte	Absorción(*)
No estructural o baja deformación	280 Joules
Soporte moderado	360 Joules
Alto nivel de soporte	450 Joules

\*Medido en panel ASTM C1550 con 40mm de deflexión

Tabla 3.3 Tenacidad recomendada en obras civiles

Deformación	Absorción(*)
Pequeña	3 MPa resistencia residual*
Grande	400 Joules**

\* 3mm de deflexión medido en EN 14488-3

\*\* 40mm de deflexión medido en ASTM C1550

### 3.6 Densidad (masa / unidad de volumen)

La densidad (masa / unidad de volumen) es un indicador de la calidad del hormigón proyectado, su densidad normal suele estar entre 2.200 y 2.400 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, la densidad no es un buen indicador del nivel de compactación a menos que se disponga de datos históricos para un diseño de la mezcla específico. Las variaciones se producen como resultado de cambios en el diseño de la mezcla, de la selección de los áridos, su forma y su densidad y de variaciones en la compactación del hormigón proyectado.

La variación relativa entre la densidad del hormigón ya proyectado en comparación con la densidad de probetas moldeadas del mismo hormigón proporciona una indicación de la calidad de la proyección y debiera ser mayor a 98%.

El efecto de una compactación insuficiente del hormigón proyectado puede ser una reducción significativa en la resistencia a la compresión y a la flexión (aproximadamente 4% por cada 1% de contenido de vacíos). Una compactación inadecuada se refleja en una baja de la densidad del hormigón colocado comparada con la densidad del hormigón medida en probeta moldeada.

### 3.7 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (Ec), a menudo llamado Módulo de Young, es una medida de la rigidez mecánica del hormigón proyectado. El módulo de elasticidad en general se sitúa entre 25-30 GPa a una edad de 1 año.

El hormigón proyectado con acelerante es generalmente menos rígido que el hormigón proyectado que no tiene acelerante. El módulo de elasticidad se ve afectado por el tipo de agregado grueso utilizado en una mezcla, pero es difícil de controlar y, por tanto, rara vez se especifica en aplicaciones de hormigón proyectado.

### 3.8 Retracción por secado

La retracción por secado del hormigón no restringido es una medida de la reducción en su longitud, a lo largo de una dimensión lineal, cuando se reduce su contenido de humedad. La retracción restringida de un material será menor que la retracción por secado no restringida, pero la relación entre los dos parámetros es compleja. La retracción por secado del hormigón proyectado varía con el contenido de agua, el tipo y tamaño de los agregados y las proporciones de la mezcla. La alta retracción por secado experimentada por el hormigón proyectado comparado con un hormigón normal de bajo asentamiento puede requerir de juntas de control más cercanas.

### 3.9 Fluencia lenta (Creep)

La fluencia lenta es la deformación en el tiempo de un material bajo carga. La deformación por fluencia lenta sufrida por un material se expresa comúnmente como una proporción respecto a la deformación unitaria a corto plazo producto de la deformación elástica. Este multiplicador se denomina "coeficiente de fluencia lenta". La fluencia lenta en flexión del hormigón proyectado no está necesariamente relacionada con la fluencia del mismo material sometido a compresión, especialmente después que se ha producido la fisuración. Existe limitada información disponible sobre la tasa de fluencia lenta en flexión del hormigón proyectado reforzado con fibras después de la fisuración (Bernard<sup>20</sup>; McKay y Trottier<sup>21</sup>).

Para una mezcla de hormigón proyectado bien diseñada, con una razón agua/cemento baja, se puede esperar una deformación por fluencia lenta similar a la exhibida por hormigones tradicionales de buena calidad. Cuando el contenido de agua es alto, la deformación por fluencia lenta bajo un determinado nivel de tensión también será mayor. El coeficiente de fluencia lenta de un hormigón proyectado será mayor que el de un hormigón moldeado debido al mayor contenido de pasta.

### 3.10 Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica es la magnitud en la que el hormigón proyectado se expande o se contrae cuando la temperatura aumenta o disminuye. El valor del coeficiente de expansión térmica generalmente se requiere para realizar cálculos de control de grietas, en particular para aplicaciones a altas temperaturas (por ejemplo, revestimientos refractarios).

Normalmente se adopta una estimación de 11  $\mu$ strain/ $^{\circ}$ C (Australia), tanto para hormigón proyectado como para hormigón convencional. El coeficiente de expansión térmica del hormigón varía directamente con el coeficiente de expansión térmica del agregado grueso y depende del contenido de sílice (cuanto mayor es el contenido de sílice, mayor es el coeficiente de expansión térmica del agregado, Neville<sup>22</sup>).

### 3.11 Durabilidad

#### 3.11.1 Generalidades

El término durabilidad describe la capacidad del hormigón proyectado para resistir las influencias agresivas dentro del entorno de servicio a que está expuesto. Las influencias agresivas pueden incluir el clima, las temperaturas extremas, el agua de mar, el contacto con productos químicos o el impacto y la abrasión. El shotcrete puede exhibir una durabilidad comparable al hormigón convencional, por lo que la mayoría de las consideraciones de durabilidad y los ensayos que se aplican al hormigón convencional también se aplican al hormigón proyectado.

El uso de altas dosis de acelerante en hormigón proyectado puede ser perjudicial para la durabilidad si no se toma en consideración en el diseño de la mezcla, pero puede ser beneficioso para reducir los efectos de los ciclos de hielo y deshielo. La resistencia del hormigón proyectado por vía seca frente al ciclo hielo/deshielo puede ser mayor que la del hormigón proyectado por vía húmeda si se mantienen bajos niveles de relación agua/cemento. La incorporación de un agente incorporador de aire en el hormigón proyectado húmedo puede reducir esta diferencia de comportamiento, pero una gran cantidad del aire presente durante la mezcla se pierde en el proceso de proyección (por ejemplo, de 18 % de contenido de aire inicial este se puede reducir a solo un 6 % en el hormigón colocado después de la proyección, Beaupre et. al.<sup>23</sup>).

#### 3.11.2 Contenido de cloruro y sulfato

Los cloruros pueden estar presentes en el hormigón proyectado si se han incorporado a la mezcla a través del uso de agregado contaminado, agua de mar, agua salobre, o por aditivos que contienen cloruros. Las principales preocupaciones debido a la presencia de iones de cloruro en el hormigón proyectado son los efectos adversos sobre la corrosión de los refuerzos de acero y el aumento de la retracción por secado.

Un elevado nivel de sulfatos puede estar presente en el hormigón proyectado proveniente de la composición de sus materiales componentes (es decir, del cemento, áridos, aditivos y agua). Los efectos adversos más frecuentes en hormigón proyectado, debido a la presencia de altos niveles de sulfatos, están en la solidez de la matriz de hormigón, los tiempos de fraguado y en la resistencia a edades tardías.

#### 3.11.3 Permeabilidad del shotcrete

La permeabilidad del hormigón es una medida de su resistencia al paso de gases o líquidos. Desafortunadamente, la permeabilidad es difícil de medir directamente, por lo tanto, se utilizan parámetros como la profundidad de penetración de agua a través de una muestra de hormigón después de un período dado de exposición para indicar la permeabilidad relativa. La profundidad de penetración de agua a través del hormigón proyectado incluido en las obras se puede determinar de acuerdo con la norma DIN

1048 Parte 5 o de NCh2262. La profundidad de penetración máxima permitida para diversas condiciones de exposición puede variar entre 30 y 50 mm, pero debe considerarse que la variabilidad normal en este parámetro para las muestras así preparadas es de aproximadamente 15 a 20mm de profundidad de penetración. (ver capítulo de ensayos)

### 3.11.4 Absorción de agua y ensayos de compactación

La absorción del hormigón es la cantidad de agua (u otro líquido), que el hormigón absorbe a través de los vacíos y poros cuando se sumerge en dicho líquido. Por consiguiente, la capacidad de absorción del hormigón proyectado es una medida indirecta del volumen de vacíos en el material. Pueden realizarse diversas pruebas en relación con el contenido de huecos en el hormigón proyectado, y es posible también especificar los valores máximos (por ejemplo, el volumen aparente máximo de vacíos permeables o la máxima tasa de absorción en agua hirviendo). Estas pruebas se especifican a menudo en hormigón proyectado para comprobar el grado de compactación in situ. Por lo general, se realizan en testigos extraídos de paneles de prueba.

El nivel de compactación conseguido también se puede medir como la diferencia relativa de densidad del hormigón proyectado en comparación con la densidad del hormigón en probeta modelada.

### 3.11.5 Reactividad álcali-sílice (ASR)

Esta reacción ocurre normalmente entre los constituyentes de sílice reactiva dentro del agregado y los álcalis en el cemento, y también se conoce como reactividad álcali-agregado (AAR). La reacción se inicia con un ataque a los minerales silíceos en el agregado por hidróxidos alcalinos en el agua intersticial derivado de álcalis que pueden haberse originado desde el interior del hormigón, a través de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  en el cemento o externamente por alguna otra fuente. Esto se traduce en un gel de álcali-sílice que se forma, ya sea en planos de debilidad o poros en el agregado (donde este presente la sílice reactiva), o en la superficie de las partículas de agregado. Esto puede afectar la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento hidratada circundante. El "gel" se embebe de agua y puede hincharse causando la expansión y la fracturación del agregado y posiblemente la fisuración del hormigón. Esta reacción sólo tiene lugar con la presencia de humedad. El cemento con adiciones como el usado normalmente en nuestro país ha probado ser un medio eficaz de reducir la expansión debido a la ASR.

## 3.12 Unión al sustrato

La resistencia de la unión entre una capa de hormigón proyectado y un sustrato subyacente depende de muchas variables, incluyendo el tipo y la condición del sustrato.

Diferentes materiales presentan amplia diferencia en su capacidad de adherencia. La superficie a proyectar debe estar limpia y

sin residuos para maximizar el desarrollo de la adherencia se ha observado que la preparación por hidrolavado promueve una mayor capacidad de adherencia (Clements et al<sup>25</sup>) en tanto que, en algunas aplicaciones, el uso de un agente promotor de adherencia también puede mejorar esta capacidad. No se conoce mucho sobre el desarrollo de la resistencia a la adherencia a edades tempranas, pero podemos obtener más información sobre este tema en Bernard<sup>26</sup>.

Debido al carácter indeterminado de la mayoría de los sustratos se debe evitar el especificar la resistencia de adherencia mínima entre el hormigón proyectado y un sustrato subyacente. Es más racional el especificar un método de preparación de la superficie que maximice las oportunidades de desarrollo de adherencia del hormigón proyectado con el sustrato.

A nivel internacional, se puede recomendar el método de prueba de adherencia de EFNARC. Una prueba simple para examinar la existencia de cualquier variación de adherencia es la prueba de golpes con un martillo sobre el hormigón, usado como método de auscultación. (ver el capítulo de ensayos). Se debe tener presente que la adherencia de un revestimiento de hormigón con un sustrato que se deforma se reducirá a cero en el tiempo, por lo que se suelen utilizar en estas situaciones pernos entre el revestimiento y el sustrato. Debido a las razones anteriores rara vez se especifica la adherencia.





## 4

## CAPÍTULO

**Materiales Constituyentes**

El hormigón proyectado está constituido por cemento, árido fino (arena) y árido grueso (hasta 10mm), agua, aditivos y eventualmente adiciones finas complementarias tales como la microsílíce. La relación a/c, que corresponde a la masa de agua dividida por la masa total de cemento en la mezcla de hormigón proyectado, es un parámetro importante especialmente en las especificaciones tradicionales de durabilidad del hormigón, aun cuando su uso en nuestro país se está abandonando en favor de mediciones directas de la permeabilidad del hormigón.

**4.1 Cemento**

El cemento normalmente utilizado en nuestro país para hormigón proyectado es el cemento portland puzolánico o portland siderúrgico de alta resistencia, el que debe cumplir con la norma NCh148.

**4.2 Materiales finos complementarios****4.2.1 Microsílíce**

La microsílíce o humo de sílice (sílica fume) es una forma de sílice amorfa. Es un material finamente dividido que se puede añadir al hormigón proyectado para mejorar o lograr ciertas propiedades en estado fresco y/o endurecido. Los beneficios del uso de humo de sílice en el hormigón proyectado incluyen: una mayor durabilidad incluyendo la reducción de la permeabilidad debido al menor tamaño de partícula, el que es significativamente más pequeño que una partícula de cemento; la reducción del rebote; mejora de la adherencia a los sustratos; mejora en la capacidad de bombeo, reduciendo el desgaste en la bomba y la boquilla; y mejora en la cohesión de la mezcla lo que permite la proyección de shotcrete de capas más gruesas. Una dosis típica de humo de sílice en el hormigón proyectado generalmente oscila entre 5% a 10% en peso con respecto al cemento, pero se recomienda consultar la opinión de un especialista para determinar los niveles adecuados a una aplicación específica.

**4.3 Áridos**

Los agregados deben cumplir con la norma NCh163. Cada árido individual en la mezcla debe tener una clasificación de acuerdo con la granulometría recomendada por el proveedor o el comprador. Las granulometrías fuera de NCh163 se pueden

utilizar si se demuestra que su uso en el shotcrete permite lograr el comportamiento requerido. Generalmente el uso de arenas más finas en el shotcrete resulta en una mayor retracción, mientras que el uso de arenas gruesas generalmente resulta en aumento del rebote. En el capítulo 5 se pueden encontrar granulometrías o bandas combinadas para shotcrete recomendadas por el ACI, EFNARC y la norma Austriaca.

Es necesario que los áridos propuestos para ser usados en shotcrete hayan sido previamente ensayados para determinar su contenido de sales, cloruros y sulfatos, de acuerdo a las normas Chilenas u otras normas pertinentes antes de aceptar su uso.

**4.4 Agua de mezclado**

La calidad del agua de mezclado puede tener un efecto significativo en el comportamiento del hormigón proyectado. El agua de amasado debe ser obtenida a partir de una fuente de calidad aceptable que cumpla con la norma NCh1498, fundamentalmente agua potable, si es posible. Si el agua potable no está disponible, se necesitan más pruebas para determinar su idoneidad.

Sólidos disueltos superiores a 3000 ppm pueden afectar al comportamiento del hormigón proyectado y su durabilidad. Cuando sea necesario, se debe utilizar agua refrigerada o calentada para ajustar o controlar la temperatura del hormigón durante el mezclado.

**4.5 Aditivos químicos****4.5.1 Generalidades.**

Los aditivos químicos y su uso debe cumplir con la norma NCh2182 (ciertas características de los aditivos no están consideradas en las normas Chilenas, en ese caso es recomendable considerar normas ASTM o UNE como referencia). Cuando se proponen dos o más aditivos para su incorporación en una mezcla de hormigón proyectado, se debe probar su compatibilidad antes de su uso, para evitar efectos no deseados o, alternativamente, los fabricantes de los aditivos deben certificar la idoneidad de la secuencia propuesta y su compatibilidad. Los aceleradores de fraguado de hormigón proyectado y otros aditivos, que se añaden al hormigón proyectado en la boquilla, deben ser abastecidos a la mezcla por algún sistema mecánico calibrado en dosis que no excedan el

máximo recomendado por el fabricante o por el proyecto. Las readiciones de aditivos a la mezcla tienen una efectividad decreciente a medida que la edad de la mezcla aumenta.

Existen cuatro categorías principales de aditivos químicos para hormigón proyectado, los que se enumeran a continuación y se utilizan para mejorar algunos aspectos del comportamiento del hormigón proyectado, tales como la capacidad de bombeo, el control del fraguado y de la hidratación y la resistencia.

#### 4.5.2 Reductores de agua de bajo rango.

Los reductores de agua se utilizan para mejorar la trabajabilidad y/o reducir la relación agua/cemento. Pueden tener otros efectos como un retraso en el inicio de fraguado y puede ser necesaria la opinión de un experto y/o ensayos para verificar este comportamiento. Hay que advertir que el ajuste de la mezcla puede ser demoroso. Se debe consultar las recomendaciones del fabricante para obtener detalles específicos y para realizar en conjunto los ensayos que se puedan requerir.

#### 4.5.3 - Reductores de agua de alto rango (superplástificantes).

Los reductores de agua de alto rango y su uso no están incluidos en la norma NCh2182, por tanto queda a criterio del proveedor y la constructora la realización de los ensayos de aptitud, compatibilidad y desempeño. Los reductores de agua de alto rango se utilizan para aumentar la resistencia final, por su manejo en bajas relaciones de agua/cemento, o para aumentar considerablemente la trabajabilidad de una mezcla sin perder resistencia. El desarrollo tecnológico ha permitido disponer de aditivos plástificantes de alto rango que permiten usar razones agua/cemento muy inferiores a las corrientes, logrando mayores resistencias, mayor trabajabilidad y una mejor bombeabilidad. Los superplástificantes normalmente sólo se añaden al hormigón proyectado por vía húmeda. Las dosis, dependiendo del tipo de superplástificante, generalmente varían de 0,5 % a 2 % en peso del cemento (siempre es necesario respetar las indicaciones del fabricante al respecto).

#### 4.5.4 Controlador de hidratación.

El hormigón que requiere ser transportado a distancias considerables o mantenido en un estado plástico por un número de horas o días, requiere la adición de aditivos especiales para mantener la trabajabilidad adecuada. El proceso de hidratación del cemento ocasiona una rápida reducción de la trabajabilidad debido a la formación de cristales de silicato de calcio hidratado, los que se entrelazan. Para evitar este proceso, se puede incorporar un aditivo de control de hidratación, comúnmente conocido como un "estabilizador", el cual cubre los granos de cemento y detiene temporalmente el proceso normal de hidratación. La extensión de tiempo que se logra antes del inicio de fraguado se determina por la dosis de aditivo utilizada. La hidratación del hormigón proyectado puede ser reactivada con adición de un acelerante de fraguado.

La pérdida de asentamiento se puede seguir produciendo aun con el uso de un aditivo estabilizador. El hormigón debe remezclarse durante un período de tiempo suficiente antes de su uso para superar la posible segregación que puede ocurrir mientras estuvo en reposo.

Los aditivos para control de la hidratación y su uso no están incluidos en la norma NCh2182, por tanto sigue siendo una oportunidad de mejora para constructores y mandantes. Su uso debe estar sujeto a ensayos de desempeño y compatibilidad los que debieran estar definidos en un documento como procedimiento interno del proyecto.

#### 4.5.5 Acelerantes.

Los acelerantes se utilizan principalmente para ayudar a la colocación del hormigón proyectado mediante la aceleración del fraguado normal de la mezcla y también pueden acelerar el desarrollo de resistencia inicial. La sobredosis de un acelerador del fraguado puede retardar la velocidad de desarrollo de la resistencia y comprometer la durabilidad del hormigón, por lo que se deben respetar las recomendaciones del fabricante. Los aceleradores de fraguado se añaden al hormigón en la tobera o en la manguera de distribución de hormigón proyectado por vía húmeda y se añaden en el recipiente o la boquilla para hormigón proyectado por vía seca. Entre las ventajas de la utilización de aceleradores de hormigón proyectado se incluyen importantes reducciones en el desprendimiento y deslizamiento del material proyectado además del aumento de los espesores de capa, especialmente en proyecciones sobre cabeza, y el aumento de velocidad de la construcción. Los aceleradores de hormigón proyectado deben ser tipo álcali-free y no cáustico. Este tipo de acelerador tiene aproximadamente un pH 3 y permite un entorno de trabajo más seguro para los operadores de hormigón proyectado en comparación con los acelerantes más antiguos cuyo pH estaba en el rango de 11 a 13.

Los aceleradores de hormigón proyectado pueden reducir la resistencia del hormigón a largo plazo en comparación con una mezcla sin acelerante. La reducción de resistencia se produce a medida que aumenta la dosis, por lo tanto es importante disponer de los datos de ensayo del acelerante y controlar las dosis máximas, en especial el uso que los operadores hacen del mismo. Las dosis varían generalmente de 3% a 8% en peso del cemento. Los aceleradores se suministran normalmente en forma líquida aunque también están disponibles en forma de polvo.

Los aceleradores de fraguado para hormigón proyectado no se deben confundir con los aceleradores de hidratación de uso común para hormigón colado en sitio. Las dos clases de acelerador comprenden claramente diferentes grupos de productos químicos con diferentes vías de reacción y diferentes efectos sobre la velocidad de fraguado, hidratación y sobre la durabilidad de la matriz de hormigón, y en algunas ocasiones sobre la corrosión del acero de refuerzo.

Los aceleradores para hormigón moldeado promueven un aumento en la velocidad de hidratación de los silicatos de calcio. Los acelerantes para hormigón proyectado promueven un fraguado rápido mediante generación de cristales de

etringita o promoviendo la rigidización a través de la formación de gel entre las partículas de cemento que se encuentran en suspensión dentro de la pasta. La formación de cristales de etringita o gel puede ser muy rápido haciendo que el shotcrete rigidice rápidamente.

Tabla 4.1 Acelerantes para uso en hormigón normal y hormigón proyectado - shotcrete

Clase / Categoría	Compuesto activo	Características
Químicos para hormigón normal.		
Cloruro de Calcio	CaCl <sub>2</sub>	Relativamente rápido, aumenta la exudación y retracción por secado, promueve la corrosión del acero.
Nitrato de Calcio	CaNO <sub>3</sub>	Seguro, pero relativamente lento, aumenta la retracción.
Trietanolamina	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>	Seguro, pero relativamente lento, aumenta la retracción.
Químicos para hormigón proyectado - shotcrete		
Hidróxidos	NaOH, KOH	Altamente cáustico, dañino para los ojos.
Carbonatos	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Altamente cáustico, dañino para los ojos.
Aluminatos de sodio	NaAlO <sub>2</sub>	Cáustico, promueve la rigidización mediante la formación de gel.
Silicato de sodio	NaO·nSiO <sub>2</sub>	Altamente cáustico, dañino, promueve la rigidización a través de la formación de gel.
Aluminato de calcio	CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	No cáustico, ligeramente alcalino y seguro, conocido como tipo "alkali-free", acelerante en base de polvo.
Sulfato de aluminio	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	No cáustico, ligeramente ácido y seguro, conocido como tipo "alkali-free", acelerante en base líquido o polvo.

La tabla 4.1 incluye una lista de acelerantes químicos disponibles para hormigón moldeado y para hormigón proyectado.

Los acelerantes más modernos del tipo libre de álcalis (alkali-free) se ubican en las últimas dos líneas de la tabla 4.1. Se denominan "libre de álcali" porque carecen de iones alcalinos (ya sea de sodio Na<sup>+</sup> o potasio K<sup>+</sup>). Todos los aceleradores de hormigón proyectado del tipo alcalinos son peligrosos debido a las quemaduras cáusticas que podrían causar en la piel, los pulmones y especialmente en los ojos. Estos aceleradores de fraguado alcalinos han sido en Chile de uso frecuente pero existe la tendencia a reemplazarlos por los de tipo libre de álcalis, en concordancia con la práctica internacional.

Los acelerantes usados normalmente en hormigón moldeado no son lo suficientemente rápidos para promover una adecuada rigidización del shotcrete para aplicaciones sobre cabeza. Ellos se aplican normalmente en el mezclador y les toma aproximadamente una hora antes de incrementar la velocidad de hidratación.

Se debe tener presente que tanto los acelerantes basados en aluminato de calcio y basados en sulfato de aluminio promueven la rápida formación de cristales de etringita como el mecanismo de refuerzo en hormigón proyectado a edades tempranas. Este producto de hidratación puede comprometer la durabilidad de la matriz de hormigón contra ataque de los sulfatos y por lo tanto se debe utilizar la cantidad

mínima de acelerante de fraguado necesaria para adaptarse a las necesidades operacionales.

#### 4.5.6 Otros aditivos

Estos pueden incluir pigmentos de diferentes colores, aditivos para mejorar la permeabilidad, para el control de la retracción o mejorar el curado interno. Todos los aditivos deben utilizarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y los requisitos de compatibilidad.

#### 4.6 Fibras de refuerzo

Concepto: "Filamento alargado y esbelto en forma de manojo, malla o hebra de material natural o manufacturado que puede ser distribuido a través del hormigón fresco". ASTM C 1116. La misma norma clasifica las fibras para hormigón y uso en shotcrete de acuerdo al tipo de material.

Tipo I: Fibras de acero (inoxidable, de aleación, o al carbón).

Tipo II: Fibras de vidrio (pueden sufrir el ataque de los álcalis, a menos que sean especialmente producidas como resistentes a estos).

Tipo III: Fibras sintéticas (polipropileno de homopolímero virgen, otros materiales deben poseer historial de durabilidad).

Las fibras suelen ser cortas (hasta 65 mm de largo) y delgadas (menos de 1 mm de diámetro) por lo general de gran capacidad

a la tracción. Las fibras pueden añadirse para mejorar la resistencia al impacto, o controlar la retracción, pero su función principal es proporcionar capacidad de carga después de la fisuración del hormigón proyectado, para lo cual se utiliza macro fibras ya sea de acero o sintéticas. Las fibras generalmente no aumentan la resistencia a la tracción o resistencia a la flexión de la matriz de hormigón cuando se usan dosificación normales.

Dentro de los beneficios de las fibras en comparación con el uso del refuerzo de malla de acero se incluye una distribución más uniforme del refuerzo a lo largo del hormigón proyectado, resulta más económico en términos generales, reduce el rebote y mejora la compactación. El hormigón proyectado con Fibra (FRS) también pueden seguir el perfil irregular sobre la roca, esto le otorga más eficiencia que el refuerzo con malla. También se evita la vibración de la malla que puede conducir a una pérdida de unión con el sustrato. La logística también se puede simplificar en comparación con el refuerzo de malla debido a mejoras en la aplicación, la seguridad y la productividad del proyecto.

Las características de las fibras que afectan al comportamiento del hormigón proyectado son: la relación de aspecto (longitud total respecto al diámetro), resistencia a la tracción y la forma y dosis ( $\text{kg}/\text{m}^3$  de hormigón proyectado). Sin embargo, si el comportamiento posterior a la fisura del hormigón proyectado es relevante, entonces el criterio principal que se debe especificar es la tenacidad.

Los materiales típicos de refuerzo de fibra son alambre de acero, láminas de acero cortadas o polipropileno (monofilamento o fibrilado). Los materiales menos comunes que se utilizan para las fibras son el nylon, el vidrio y el carbono. Las fibras en general se pueden clasificar como estructural (acero y macro fibras sintéticas) y no estructural (micro fibras sintéticas). El comportamiento de la fibra post-fisura estructural debe especificarse en términos de la tenacidad. Las micro fibras sintéticas generalmente se usan sólo para controlar el agrietamiento por retracción plástica, pero también son útiles para reducir el rebote. Además contribuyen a la liberación de gases y a reducir el desconche del hormigón proyectado cuando se somete a cargas de fuego. La dosificación de micro fibras sintéticas se encuentra generalmente en aproximadamente 1 a 2  $\text{kg}/\text{m}^3$  de hormigón proyectado.

Aunque se recomienda que no se especifique el recuento de fibras, la verificación de la adición real de la fibra se puede basar en un ensayo de recuento de fibras. Sin embargo, este es un ensayo poco confiable debido a la mala distribución de las fibras en muestras pequeñas. El recuento de las fibras se puede hacer mediante un ensayo de lavado del hormigón proyectado con fibras en vía húmeda o por recuento de las fibras en testigos triturados o probetas (este último solo para fibras metálicas). Estos métodos de ensayo serán descritos en el capítulo de ensayos.

Las siguientes figuras corresponden a tipos de fibras utilizados en diversas aplicaciones de hormigón proyectado con fibras (FRS).



Figura 4.1 Es una tendencia en algunos fabricantes, la entrega de fibras de acero con extremo de gancho pegadas entre sí cuando se envasa para reducir la tendencia a la formación de bolas en el interior de la mezcla de hormigón.

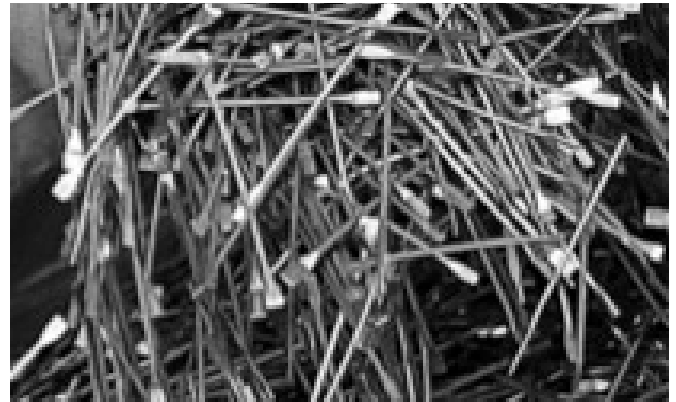


Figura 4.2 Algunos tipos de fibra de acero, tales como las fibras de extremo aplanado se empaquetan en forma suelta.



Figura 4.3 Macro fibras sintéticas.



Figura 4.4 Micro fibras sintéticas (de especial uso en Shotcrete para la protección de incendios).

## 4.7 Mallas o barras de acero

Al igual que en el hormigón convencional el refuerzo de acero se utiliza en situaciones donde se requiere que el hormigón proyectado resista esfuerzos de tracción. La cantidad de armadura necesaria para fines estructurales se debe calcular de acuerdo con los códigos de diseño correspondientes. El tamaño de malla recomendado para cualquier calibre de barra es de un mínimo de 50x50 mm o 100x100 mm de espaciado de la cuadrícula o superior. Debe tenerse presente que se obtiene una estructura más robusta cuando el acero de refuerzo está diseñado y colocado para causar la menor interferencia con la colocación del hormigón. Se deben usar diámetros de barra reducidos para ayudar al encapsulamiento con el hormigón, siendo normalmente 16 mm el diámetro máximo. Cuando se requieren barras de mayor diámetro, se debe tomar un cuidado especial en envolver la barra con el hormigón proyectado. El refuerzo debe ser apoyado y se debe mantener alejado de la superficie a proyectar a una distancia mínima de 25 mm, pero siempre de acuerdo con los requisitos especificados para el recubrimiento en los planos de diseño. Para evitar la vibración de las barras de acero durante la proyección del hormigón estas deben ser amarradas rígidamente en su lugar.



Figura 4.5 Aplicación de shotcrete sobre malla.



Figura 4.6 Instalación de malla en túnel.





# 5

## CAPÍTULO

### Diseño de la Mezcla

#### 5.1 Generalidades

Muchos de los principios de la tecnología del hormigón convencional se pueden aplicar a la elaboración de la mezcla de hormigón proyectado, particularmente al hormigón por vía húmeda. Las principales diferencias entre el hormigón convencional y el hormigón proyectado son la granulometría del árido, el contenido de cemento, método de transporte y colocación y la selección de aditivos. El proceso de diseño de la mezcla necesita considerar, pero no está limitada a, los siguientes aspectos:

- **Proyección** - la mezcla debe ser capaz de ser transportada y colocada con el mínimo de rebote. La aplicación puede ser realizada sobre superficies horizontales, verticales o sobre cabeza.
- **Resistencia** – se debe satisfacer los requisitos de resistencia temprana y a largo plazo dependiendo de la aplicación. Se debe tener en cuenta el efecto del acelerante de fraguado en las resistencias a largo plazo.
- **Compactación** - la mezcla debe ser capaz de ser compactada para formar un material homogéneo y denso.

El diseño y prueba de una mezcla de hormigón proyectado debe basarse en las condiciones previstas que prevalecerán en el sitio para que en estas condiciones, con el método de aplicación y los operadores propuestos, se logre un hormigón proyectado de la calidad especificada. Hay dos enfoques generales para las especificaciones, el basado en el desempeño y el enfoque prescriptivo.

- > Las especificaciones prescriptivas se enfocan en detalles de cómo el hormigón proyectado debe ser dosificado, producido y colocado, pero rara vez incluyen la evaluación de las propiedades del producto final. Este enfoque desalienta la innovación al limitar la capacidad de un contratista para utilizar las nuevas tecnologías y métodos de aplicación para lograr el resultado deseado con mayor eficacia. También puede promover malas prácticas al omitir la obligación de demostrar que el comportamiento del hormigón proyectado es satisfactorio.
- > Las especificaciones basadas en el desempeño se centran en producir en terreno un hormigón proyectado que tenga un nivel mínimo de desempeño que cumpla con los requisitos establecidos en el diseño. Los detalles de cómo se logra esto se dejan al contratista, por lo que se

le anima a buscar los medios más eficaces y económicos para satisfacer los niveles mínimos de desempeño especificados. Esto a menudo incluye una evaluación crítica de todos los aspectos de la producción y la colocación que pueda ayudar en la erradicación de prácticas deficientes. Las especificaciones normalmente están adaptadas para el sitio de aplicación y el tipo de estructura de que se trate (por ejemplo piscinas o túneles). Quien especifica debiera tener cuidado de no especificar innecesariamente altos niveles de comportamiento cuando ellos no son necesarios ya que el resultado será un hormigón proyectado de mayor costo.

#### 5.2 Hormigón proyectado por vía húmeda

Para grandes obras de infraestructura, el diseño y prueba de una mezcla de hormigón proyectado se realiza normalmente en dos etapas. La primera consiste en el diseño de la mezcla base. La segunda es la prueba de las mezclas de hormigón proyectado sobre paneles. La mezcla base de prueba incluye los materiales y la dosificación propuesta para la mezcla, todos los aditivos, incluidos los añadidos en la boquilla y las fibras consideradas junto a sus dosificaciones en caso de estar especificadas.

La elección de las proporciones de los materiales en la mezcla para la proyección de hormigón de grandes obras de infraestructura, se basa por lo general en la resistencia especificada a la compresión, límites al asentamiento, densidad, resistencia a la flexión o tenacidad, retracción por secado, permeabilidad, durabilidad (incluyendo las clasificaciones del grado de exposición cuando se requiera) y la aplicación en terreno. Las mezclas bombeables normalmente contienen un mayor porcentaje de arena/finos para la lubricación y para eliminar la segregación.

La elección de la mezcla de áridos de manera que se adapten a bandas de áridos combinados que han demostrado previamente un buen comportamiento puede acortar el proceso, aumentando la probabilidad de llegar a un diseño satisfactorio de la mezcla. Las granulometrías fuera de las bandas que se muestran en la Tabla 5.1 se pueden usar si se demuestra en pruebas previas a la construcción que han dado un resultado positivo o si existen resultados previos que avalan el uso de una granulometría combinada distinta. En las faenas mineras o civiles muy alejadas, los materiales locales pueden variar y esto puede necesitar de un análisis más detallado.

Tabla 5.1 Granulometrías recomendadas para shotcrete tomadas de diferentes Instituciones.

Malla		EFNARC	ACI 506- G1	ACI 506 -G2	Austria	RTA B82
ASTM	mm	Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min -Max	Min -Max
#100	0,15	6 - 16	2 - 10	2 - 10	6 - 12	2 - 10
#50	0,30	14 - 32	10 - 30	8 - 20	10 - 17	8 - 20
#30	0,60	26 - 56	25 - 60	20 - 35	21 - 29	20 - 40
#16	1,20	41 - 76	50 - 85	35 - 55	33 - 44	35 - 55
#8	2,40	59 - 92	80 - 98	50 - 70	50 - 60	50 - 70
#4	4,75	77 - 100	95 - 100	70 - 85	70 - 80	70 - 85
3/8"	10	93 - 100	100	90 - 100	90 - 97	90 - 100
5/8"	16	100		100	100	100

La Tabla 5.1 da ejemplos de recomendaciones de granulometrías combinadas tomadas de una variedad de proyectos en minería y túneles civiles con proyección remota de shotcrete, para mezclas de diferentes tamaños máximos del árido.

La recomendación establecida en la Guía de Hormigón Proyectado de la Asociación Europea EFNARC es la más utilizada debido a la tolerancia y flexibilidad en la inclusión del tamaño y distribución de áridos. Se sugiere que la curva fina de la norma ACI 506 sea utilizada para hormigón proyectado fino, como un mortero. Sin embargo, la arena usada para “capas rápidas” o de “terminación” pueden necesitar ser más fino. El uso de arenas más finas generalmente resulta en una mayor retracción por secado. El uso de arenas más gruesas generalmente resulta en más rebote. La curva granulométrica combinada debe ser continua.

No es posible recomendar dosificaciones genéricas para hormigón proyectado ya que el hormigón a emplear variará dependiendo de las particulares características de cada proyecto, diseño, materiales y técnicas de proyección utilizadas, etc.

### 5.3 Hormigón proyectado por vía seca

Los áridos deben adaptarse a las mismas granulometrías combinadas tanto para vía seca como para hormigón proyectado por vía húmeda. Para las aplicaciones de shotcrete con proyección sobre cabeza las mezclas deben ser dosificadas ajustadas a la parte más fina de la curva granulométrica, la sección media de la curva se usa para aplicaciones verticales y el sector más grueso de la curva para aplicaciones horizontales con proyección hacia abajo.

### 5.4 Diseño de mezcla para piscinas

Para piscinas, el diseño de una mezcla se basa normalmente en cumplir con determinados grados de resistencia y en el resultado de mezclas de prueba de obras anteriores. El contenido de cemento de las mezclas base puede variar entre un 16 a

un 24%, 18 a 25% de árido grueso y un contenido de arena entre un 60% a un 70% del contenido total de áridos.

Las normas Australianas y las recomendaciones de la ASA (Asociación de Shotcrete Americana) establecen los requisitos para el diseño estructural y construcción de piscinas construidas total o parcialmente con hormigón proyectado.

Las siguientes recomendaciones se formulan en relación con los diseños de mezcla de hormigón proyectado para piscinas en general (no se deben considerar como criterios rígidos en ningún caso).

- > Contenido mínimo de cemento de 350 kg/m<sup>3</sup>
- > Relación agua/cemento máxima de 0.55
- > El tamaño máximo del árido de 10 mm.
- > La granulometría combinada debe cumplir con una de las curvas mostradas en la tabla 5.1. Las granulometrías combinadas fuera de estos rangos pueden ser utilizados si las pruebas previas a la construcción demuestran que han dado buenos resultados o si existe evidencia de trabajos previos con resultados aceptables usando el árido combinado propuesto.
- > Resistencia mínima a la compresión en probeta cilíndrica de 25MPa a los 28 días.
- > La aptitud del hormigón para alcanzar la resistencia a la compresión a 28 días para la mezcla propuesta debe ser verificada previo al suministro. Esto debería llevarse a cabo a la edad de 28 días en probetas cilíndricas moldeadas de la mezcla suministrada o a partir de testigos tomados de paneles de prueba del hormigón proyectado y curadas bajo condiciones estándares. Se recomienda que el resultado de la prueba tenga una resistencia mínima de 32 MPa a la compresión a los 28 días para probetas cilíndricas moldeadas con el hormigón

suministrado y de 25 MPa para las muestras tomadas de los paneles de prueba. En el caso de hormigón premezclado, puede recurrirse a la experiencia previa del suministrador para garantizar este punto.

## 5.5 Mezclas especiales

El hormigón proyectado en ocasiones requiere desarrollar propiedades especiales, por ejemplo bajo peso específico, cualidades de aislación, resistencia al calor, resistencia a los sulfatos, requerir de un tamaño especial de arido para lograr ciertas terminaciones.

En otros países, por ejemplo Australia, ha aumentado el consumo de las mezclas con agregados livianos para la construcción de pisos y muros. El hormigón proyectado liviano se adapta mejor a las secciones delgadas o ligeramente reforzadas. Se deben tomar un cuidado particular en la planificación y ejecución del trabajo en los que estén involucrados elementos estructurales. Hay que señalar que estos agregados livianos deben estar saturados y superficialmente secos (SSS) antes de la mezcla y deben realizarse ensayos para determinar los valores de resistencia, densidad y retracción. Estas mezclas pueden necesitar ser ajustadas con respecto a los áridos “normales” para lograr un bombeo eficiente.

Las mezclas de hormigón proyectado con agregados livianos se emplean con frecuencia en países desarrollados para recubrir elementos estructurales de acero que puedan estar expuestos al fuego. El hormigón proyectado también permite reforzar estos elementos y se puede incluir en los cálculos de la sección bruta. En nuestro país estas aplicaciones no son frecuentes.

En algunas aplicaciones es preferible la utilización de un cemento de alto contenido de aluminatos sobre el cemento normal, especialmente donde se requiera un endurecimiento rápido, resistencia al calor o a los ácidos. Para revestimientos refractarios, el cemento de aluminato de calcio se utiliza comúnmente en combinación con un agregado resistente al calor. Estos agregados livianos incluyen agregados volcánicos naturales tales como escoria y piedra pómez, y agregados manufacturados tales como arcilla expandida, esquisto y escoria de alto horno. Estos productos permiten conseguir un hormigón con una moderada resistencia estructural.

Cabe señalar que el uso de cemento de aluminato de calcio debe ser investigado cuidadosamente antes de decidir su aplicación debido a su particular propiedad de fraguado rápido, su alto calor de hidratación y la posibilidad de reducción de la resistencia a largo plazo. El hormigón fabricado con cemento de aluminato de calcio también es altamente susceptible al ataque de sulfatos, por ejemplo, agua de mar. Información adicional sobre el comportamiento de este tipo de cemento se puede encontrar en Neville<sup>22</sup>.

La satisfactoria proyección de mezclas especiales puede requerir diferentes técnicas de colocación, métodos de instalación y equipos. Información adicional sobre aplicaciones refractarias

se puede encontrar en ACI 547R<sup>27</sup>. Se debe seguir las recomendaciones de las empresas fabricantes de estos productos en esta materia.

Las mezclas de hormigones proyectados resistentes a la abrasión se basan en áridos más densos o con un alto contenido de cemento por m<sup>3</sup>. Hay artículos hacen mención al uso del corindón como agregado. La matriz de la mezcla es diferente del hormigón normal y debe ser especificada por un ingeniero con experiencia en esta área.

## 5.6 Curvas granulométricas del árido combinado

La combinación de las granulometrías de las fracciones de agregados individuales dentro de una mezcla de hormigón proyectado debe ser tal que genere la mínima segregación mientras el hormigón se está transportando, buenas características de bombeo y proyección, bajo rebote y máxima densidad una vez proyectado. Por lo tanto, es necesario comprobar la granulometría combinada de las partículas del agregado correspondiente a todas las fracciones de árido en las proporciones en las que se vayan a utilizar.

El siguiente ejemplo muestra cómo la granulometría de los agregados combinados puede determinarse a partir de la proporción de cada fracción individual en el diseño de la mezcla. En el ejemplo se asume que todos los agregados tienen el mismo peso específico. La composición física del hormigón proyectado y del convencional se basa en las proporciones volumétricas. Si los pesos específicos de las fracciones de agregados individuales son diferentes el uno del otro, las proporciones deben ajustarse en consecuencia. Las cantidades totales y proporciones para el diseño de la mezcla particular utilizado en este ejemplo se muestran en la tabla 5.5 (cantidades de agregados considerando condición saturada con superficie seca).

Tabla 5.5 Ejemplo de una mezcla de áridos para uso en shotcrete.

Tipo de Árido	Masa de árido (kg/m <sup>3</sup> ) (SSS)	Proporción del total (en peso)
10mm.	235	14%
5mm.	265	16%
Arena gruesa	680	40%
Arena fina	500	30%

En la tabla 5.6 se muestra cómo se calcula la curva granulométrica combinada. El título de cada columna identifica la información contenida en ella, por ejemplo, tamaño de tamiz, tamaño nominal global y su granulometría particular, la proporción (%) de ese agregado en el total y la granulometría total calculada para el agregado combinado (suma de las columnas 3, 5, 7 y 9 para cada tamaño de tamiz por separado). Para un tamaño máximo nominal de 10 mm, estos se disponen en una escala descendente de tamaños de tamiz desde 13,2 mm a 0,150 mm (150 micras); 0,075 mm también se incluye normalmente como la fracción de mínimo tamaño.

La contribución de cada árido a la distribución de tamaño de partículas del árido combinado se calcula multiplicando la proporción del contenido del agregado total de cada árido individual por el porcentaje que pasa por el tamaño del tamiz particular que está siendo considerado. Por ejemplo, la proporción del agregado de 10 mm en el tamiz 13,2 mm es 100% lo que multiplicado por el 14% que corresponde a la proporción de ese árido en el total, da que el agregado de 10 mm contribuye con un 14%. Del mismo modo, la contribución del árido de 10 mm en el tamiz 4,75 mm es de 14% multiplicado por 6%, que se redondea a 1% (columna 3).

La granulometría combinada del agregado total de este diseño particular se muestra en la columna 10 (siendo la suma de los valores respectivos de las columnas 3, 5, 7 y 9 para ese tamaño de tamiz). Una vez que la granulometría combinada de los agregados se ha determinado se puede juzgar su aptitud al compararla con las diferentes bandas granulométricas recomendadas u otras bandas que hayan demostrado ser adecuadas en la práctica.

Se pueden desarrollar fácilmente hojas de cálculo computarizadas para poner en práctica el cálculo de las curvas granulométricas combinadas y para producir un gráfico como el mostrado en la Figura 5.1.

Tabla 5.6 Ejemplo de cálculo de curva granulométrica combinada para de árido usado en shotcrete.

Tamiz mm.	Árido de 10mm. (14%)		Árido de 50mm. (16%)		Árena gruesa. (40%)		Árena fina. (30%)		Árido combinado
	% individual	% combinado	% individual	% combinado	% individual	% combinado	% individual	% combinado	Suma columna 3, 5, 7 y 9
13.2	100	14	100	16	100	40	100	30	100
9.5	92	13	100	16	100	40	100	30	99
4.75	6	1	86	14	100	40	100	30	85
2.36	0	0	8	1	93	37	100	30	68
1.18			0	0	84	34	100	30	64
0.6					60	24	79	24	48
0.3					25	10	43	13	23
0.15					2	0.8	4	1.2	2
0.075					1	0.4	3	0.9	1.3

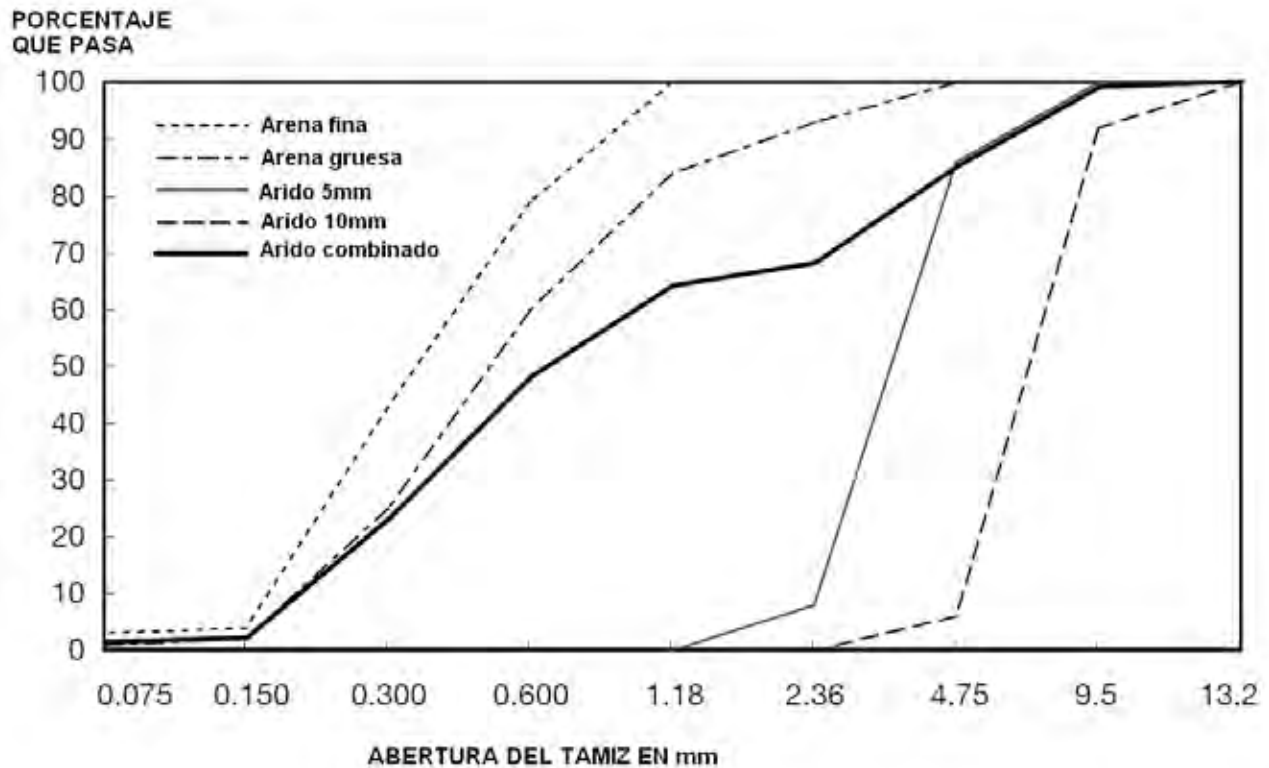


Figura 5.1 Curvas individuales y curva combinada.



## 5.7 Solución de problemas en el diseño de mezclas

### 5.7.1 Problemas de bombeo y bloqueos

La bombeabilidad se define como la capacidad de un hormigón para ser movilizadado bajo presión manteniendo al mismo tiempo sus propiedades iniciales (Gray<sup>28</sup>, Beaupré<sup>29</sup>). Las investigaciones en los últimos años sobre el bombeo del hormigón por lo general se enfocan en la estabilidad o la movilidad del material bajo presión.

En relación a la estabilidad, la principal preocupación respecto al hormigón fresco bajo presión es la posibilidad de segregación, es decir, la separación de la pasta del agregado, lo que por lo general conduce a la obstrucción de la línea. Este fenómeno se produce cuando la presión aplicada al hormigón empuja la pasta a través de la estructura del agregado lo que conduce a la acumulación de partículas más gruesas en la forma de un tapón que bloquea la línea (Browne Bamforth<sup>30</sup>). Esta segregación se asocia a menudo con mezclas que tienen una mala granulometría y/o forma de las partículas del agregado o a excesiva humedad en la mezcla.

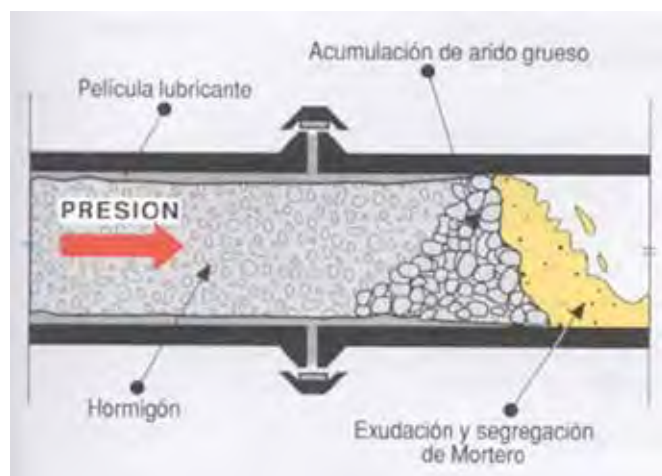


Figura 5.2 Caracterización de los problemas de Bombeo.

El hormigón proyectado normalmente carece de una fracción suficiente de árido grueso por encima de 4,75 mm como para producir mucha interferencia entre estas partículas. A pesar de esto, los bloqueos se componen habitualmente de las partículas de agregado grueso más grandes que se han separado de las fracciones más finas y se acumulan en un punto de constricción o de alta fricción en la línea. Los esfuerzos para prevenir obstrucciones mediante mejoras en el diseño de la mezcla deben centrarse en el perfeccionamiento de la curva de árido combinado para producir una curva suave y continua de 4,75 mm hacia abajo. Además, la fracción de agregado grueso (4,75 mm y más) no debe ser superior a 500 kg/m<sup>3</sup>. Como regla práctica, aproximadamente el 20% del total del agregado combinado de una mezcla debe pasar el tamiz de 300 micrómetros y al menos 450 kg/m<sup>3</sup> entre cemento y agregado debe pasar el tamiz de 150 micrómetros con el fin de bombear adecuadamente.

### 5.7.1.1 Causas comunes de bloqueos

Una mezcla que contiene un agregado bien graduado exhibirá una interferencia mecánica constructiva entre las partículas de diferente tamaño para evitar la segregación bajo la acción de un gradiente de presión. Esto ayuda a que el flujo de hormigón se mueva uniformemente a través de la línea en respuesta a un gradiente de presión. En una mezcla mal graduada esta interferencia disminuye o está ausente, de esta forma las partículas finas fluyen entre las partículas más gruesas lo que causa que las partículas más gruesas se separen de las más finas y se acumulen en una tapón. Las causas de la mala graduación granulométrica del agregado pueden incluir: un contenido de humedad variable en las fracciones de agregados a medida que se mezclan que no es compensado ajustando las pesadas, el lavado de las fracciones finas de los acopios debido a lluvias fuertes o a una mala supervisión durante el chancado o extracción.

La segregación de partículas y los bloqueos posteriores se agravan con altas presiones de bombeo. Cualquier factor que aumenta la resistencia al flujo, y por lo tanto requiere aumento de la presión de bombeo, conducirá a una mayor tendencia a la formación de bloqueos. El fenómeno se agrava por la alta fricción asociada con una lubricación insuficiente causada ya sea por una pared de la línea rugosa o un contenido inadecuado de pasta en la mezcla. Los bloqueos están comúnmente asociados con estrecheces tales como reductores en la línea de bombeo de hormigón y distancias muy largas. El uso de mangueras de goma excesivamente largas, radios excesivamente ajustados ya sea en las tuberías de acero o mangueras de goma, o reductores excesivamente cortos son los factores comúnmente asociados con bloqueos. Las mangueras de caucho que están suspendidas de un brazo manipulador controlado de forma remota son particularmente susceptibles a los bloqueos. Cuando se produce un bloqueo en esta manguera es útil colocar la línea completamente extendida en posición recta y horizontal. Los problemas de obstrucción persistentes se pueden posiblemente superar cambiando la geometría de la línea para reducir la resistencia al flujo.

El exceso de humedad en la mezcla fomentará la segregación de partículas. Por lo tanto, una alternativa para aliviar bloqueos es una reducción en el cono. La movilidad de partículas finas con relación a las partículas más gruesas se incrementa (empeora la situación) al aumentar la fluidez de la fracción fina (pasta). Una reducción en el asentamiento, y por lo tanto de la fluidez, puede ayudar a reducir los bloqueos, pero no va a solucionar los problemas de bombeo asociados con agregados pobremente graduados.

Una excesiva porosidad en los agregados gruesos también puede conducir a problemas de bombeo. Tales agregados deben ser mezclados en la condición saturada con superficie seca, para tratar de minimizar los problemas. Las partículas de agregados lajeadas o con formas inadecuadas son también problemáticas en materia de bombeo, por lo que deben ser evitadas en lo posible.

La proporción de partículas de agregado con formas inadecuadas que es admisible en una mezcla de hormigón proyectado no debería superar el 10%, lo que es más bajo de lo que se acepta en hormigón moldeado. Cualquier intento de rectificar graduaciones deficientes o formas inadecuadas de los agregados mediante la adición de más cemento suele ser contraproducente, ya que puede aumentar la tendencia a la segregación.

La solución a los problemas de bombeo y bloqueos en la mayoría de los casos se puede abordar a través de una curva granulométrica combinada suave y continua con especial atención a las fracciones más finas. Las fracciones finas del agregado pueden variar ampliamente dentro de la misma fuente original o pueden ser lavados por la lluvia en el acopio. Si las fracciones finas no pueden ser controladas de forma adecuada en la fuente original, entonces puede ser necesario lavar el agregado grueso y la arena para remover los finos, establecer la granulometría de los finos por lavado y reintroducir los finos en cantidades controladas a través del uso de por ejemplo finos de trituración, limo, arcilla calcinada u otros finos similares. Lo anterior lleva a que la forma de la curva granulométrica en el extremo fino se limite de modo más estricto de lo que sería necesario. Si se considera que esto es demasiado caro (porque el lavado es costoso) el aire incorporado puede ser utilizado como un posible sustituto ya que las burbujas de aire arrastradas actúan como partículas de agregado fino en suspensión. Sin embargo, esto sólo funcionará para el bombeo a través de distancias relativamente cortas y con baja presión. Alternativamente, la cohesión de la mezcla se puede aumentar mediante el uso de micro-fibras sintéticas, fibras sintéticas fibriladas o con la adición de un material fino complementario. Las fibras de pequeño tamaño ayudan a mantener las partículas gruesas y finas juntas en un material que fluye y producen un efecto similar a un aumento de la cohesión.

### 5.7.1.2 Cambios en la estructura de vacíos de aire

Un problema común asociado con el bombeo es la modificación de la estructura de vacíos de aire. En efecto, el uso de bombas para el transporte de hormigón generalmente da como resultado una pérdida de aire que va de uno a tres por ciento (Du & Folliard<sup>31</sup>). También se ha demostrado que la estructura de vacíos resultante no posee ninguna o muy pocas burbujas con diámetros por debajo de 50 micras (Pigeon et al<sup>32</sup>). Los mecanismos que se cree son responsables de este fenómeno son de succión y la disolución durante el proceso de bombeo o de colocación.

El mecanismo de succión se produce cuando el hormigón se somete a presiones negativas. En una bomba de pistón, la cámara del pistón se llena con hormigón no sólo por acción de la gravedad sino también por un efecto de succión causado por el pistón que se retrae. Este movimiento provoca una disminución en la presión, que causa que el aire se expanda y forme burbujas más grandes las que luego pueden escapar desde el hormigón. Este fenómeno también se observa en una sección vertical de la manguera cuando el hormigón está en caída libre.

Se puede ver una explicación para el mecanismo de disolución en Dyer<sup>33</sup>. Mientras que el hormigón se presuriza en el bombeo se cree que las burbujas de aire más pequeñas se disuelven en el agua circundante (Figura 5.3). Cuando el hormigón se despresuriza a la salida de la línea, el aire reaparece dentro de las burbujas más grandes que no se disolvieron en lugar de formar nuevas burbujas pequeñas.

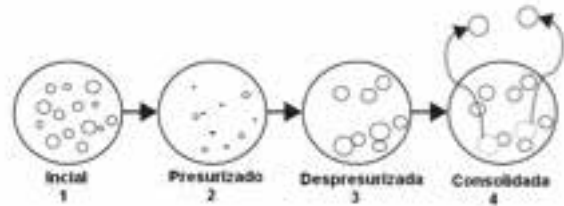


Figura 5.2 Burbujas, durante y posterior al bombeo.

Además del mecanismo de disolución, el tiempo de presurización y la presión máxima alcanzada son también parámetros importantes en el efecto de pérdida de aire. Es importante destacar que este mecanismo no altera significativamente el contenido de aire. El volumen final de aire sigue siendo prácticamente el mismo, pero se altera el factor de separación. Sin embargo, la estabilidad de las burbujas de aire más grandes que se forman es tal que estas burbujas se escapan más fácilmente durante la manipulación y la consolidación del hormigón, debido a esto se genera la pérdida de aire. Teniendo en cuenta que al menos una parte de la trabajabilidad del hormigón proyectado vía húmeda es atribuible al contenido de aire arrastrado, se deduce que el bombeo puede reducir la trabajabilidad del hormigón proyectado.

### 5.7.1.3 Contenido mínimo de pasta

El espesor de pasta en el interior de la línea de bombeo durante el flujo varía con el tipo de línea que se utilice para bombear el hormigón (por lo general un tubo de acero o manguera de goma). La proporción de pasta disponible dentro de una mezcla que se requiere para lubricar la superficie de la línea también varía con el diámetro de la línea. Las líneas de diámetro pequeño requieren una mayor proporción de la pasta total disponible que las líneas de mayor diámetro. Esto explica en parte por qué es más fácil bombear hormigón a través de una línea de gran diámetro que a través de una línea de pequeño diámetro. Los trabajos de Jolin & Beaupre<sup>40</sup> y Jolin<sup>35</sup> han demostrado que el contenido de pasta de la mezcla tiene una influencia fundamental en la capacidad de bombeo del hormigón y que el contenido de aire de la pasta debe ser considerado al estimar la cantidad útil de pasta disponible. El concepto de pasta activa se define como la cantidad de pasta (%) presente en el hormigón mientras esta bajo presión en la línea, que representa la cantidad de pasta necesaria para crear la capa lubricante contra la pared de la línea y para llenar los huecos intergranulares. Esta es una interpretación volumétrica del contenido de pasta para el material que está bajo presión. El volumen de pasta real disminuye a medida que se aplica presión en el hormigón ya que el volumen de aire disminuye a valores despreciables.

Para estimar el contenido mínimo de pasta activa necesaria para obtener un hormigón bombeable es necesario conocer



la porosidad de la fracción de agregado (es decir, la proporción en volumen del espacio entre las partículas del agregado), la densidad de la fracción de pasta, el contenido de aire (%) y el diámetro de la línea a través de la cual el hormigón va a ser bombeado. Basado en estimaciones obtenidas por Jolin et al<sup>35</sup>, el contenido de pasta activa mínima de una línea de 50 mm es de aproximadamente 33% (en volumen) y de una línea de 75 mm es de aproximadamente 30%. Se debe tener en cuenta que estas estimaciones están sujetas a ligeras variaciones dependiendo de las características granulométricas de agregado. Para obtener el contenido total de pasta necesaria para la producción de una mezcla adecuada hay que añadir el contenido de aire, que es de aproximadamente 3 a 4% (del volumen total de hormigón) para hormigón proyectado normal (sin incorporador de aire) o alrededor de 8 a 15% (del volumen total de hormigón) cuando se utiliza un incorporador de aire. El contenido de aire de un hormigón proyectado con alto contenido de aire incorporado se estima mejor mediante la medición de la densidad en estado fresco (antes y después de la adición del incorporador de aire) y observando la diferencia, debido a que los equipos para medir el contenido de aire no funcionan para contenidos superiores al 10%. Estas estimaciones de contenido mínimo de pasta se refieren sólo al bombeo y no indican necesariamente una buena capacidad de proyección o de adherencia.

### 5.7.2 Hormigón proyectado que no se adhiere al sustrato

Cuando se proyecta sobre un sustrato vertical o sobre cabeza es necesario que el hormigón proyectado se adhiera sobre la superficie por un período de tiempo suficiente mientras está en estado fresco hasta que endurece en el lugar y queda adherido de forma permanentemente. Si no se adhiere a la superficie puede dar lugar a que el hormigón se deslice o caiga por completo, lo cual requiere de reparaciones molestas y de alto costo. En muchos casos las caídas pueden también poner en peligro la capacidad del hormigón proyectado para estabilizar el suelo y la seguridad de personas y equipos. Una mezcla “pegajosa” que se mantiene firmemente en su lugar después de la proyección presenta muchas ventajas tanto para para el constructor como para el mandante.

La incapacidad del hormigón proyectado para pegarse a una superficie puede ser causada tanto por la falta de adherencia entre el hormigón y el sustrato o por una insuficiente cohesión dentro del propio hormigón. La falta de adherencia se manifiesta usualmente como caídas de hormigón fresco con una separación que claramente se produce en la interfaz con el sustrato.

Una cohesión inadecuada puede manifestarse de muchas maneras, pero se revela comúnmente por una separación de la mayor parte de una capa de revestimiento (a menudo de aspecto fresco) de un hormigón que permanece unido al sustrato.

#### 5.7.2.1 Problemas de adherencia

Una adherencia inadecuada se puede deber a:

- > Una pasta de cemento con características de adherencia inherentemente pobres. La mayoría de las pastas de cemento son pegajosas en cierta medida, pero se producen excepciones y cuando se reduce esta característica, se puede requerir la adición de materiales finos complementarios.
- > Una mala técnica de proyección, tal como la proyección desde una distancia excesiva, o una presión de aire excesivamente baja o elevada o capas demasiado gruesas en una sola pasada.
- > Una superficie de sustrato seca que conduce al desecamiento de la zona de contacto, la pérdida de humedad del hormigón y a la pérdida de adherencia. La solución a esta situación es humedecer previamente el sustrato.
- > La suciedad en el sustrato que a menudo es causada por el material acumulado proveniente de las actividades de construcción o polvo y rebote de hormigón proyectado proveniente de operaciones anteriores. La solución a este problema es limpiar con un chorro de agua a alta presión antes de la proyección de hormigón.
- > Un sustrato contaminado con aceite. Esto puede ser causado por aceite hidráulico en suspensión en el aire proveniente de equipos de minería o construcción defectuosos. El aceite sobre el sustrato debe ser removido si se quiere lograr adherencia. El fluido hidráulico nunca se debe usar para lubricar la línea de hormigón antes del bombeo, debido al riesgo de salud que representan los aerosoles del fluido hidráulico y el riesgo para el desarrollo de adherencia en superficies rocosas cercanas y posibles efectos perjudiciales en la mezcla.
- > El exceso de agua en el sustrato, a menudo asociado con la entrada de agua desde el suelo. Este puede ser un problema difícil de resolver. Los desprendimientos se pueden evitar algunas ocasiones mediante una proyección muy rápida y con una alta dosis de acelerante de fraguado, pero esto va a comprometer el comportamiento a largo plazo del hormigón. Una alternativa que puede funcionar cuando existen ingresos de agua puntuales es instalar un sustrato intermedio tal como una barbacana para crear de desvío para el agua y aliviar la presión. También se puede proyectar el revestimiento alrededor de los puntos de entrada de humedad o agua, instalar un drenaje para aliviar la presión del agua en el punto de entrada y luego atacar la zona difícil proyectando una mezcla que contiene 2 kg/m<sup>3</sup> de micro-fibra sintética como puente entre las zonas adyacentes de hormigón endurecido. Una segunda alternativa es anclar una malla con pernos sobre la zona difícil y utilizar esto como un soporte para una capa posterior de hormigón proyectado reforzado con fibra. La mayoría de las opciones para hacer frente a las zonas de alta afluencia de agua son lentas y caras, pero no existen muchas alternativas.

Se debe tener presente que el hormigón proyectado que se desprende con rocas adheridas probablemente indica la preparación inadecuada antes de la proyección y no necesariamente una mala adherencia. Los suelos estratificados o laminados pueden ser particularmente propensos a esto si la disposición en capas tiene una orientación desfavorable. Posiblemente un hidrolavado puede eliminar las partes sueltas o se puede usar una malla como puente para un hormigón proyectado reforzado con fibra en zonas especialmente complejas.

### 5.7.2.2 Problemas de cohesión

Una mala cohesión del hormigón proyectado se manifiesta típicamente de dos maneras. La primera tiene que ver con la cohesión como una propiedad del hormigón fresco antes de la proyección. Este tipo de cohesión es una propiedad del hormigón proyectado en el estado plástico que está relacionada con su propensión a segregar durante el mezclado y la colocación si no es bien dosificado o mezclado. Mantener la cohesión de una mezcla de hormigón proyectado a través de un diseño cuidadoso y la reducción al mínimo del agua disminuye la probabilidad de que el agregado más grueso decante fuera de la mezcla y también reduce el potencial problema de una separación entre el agregado y la pasta de cemento durante el transporte y cuando es sometido a un gradiente de presión.

La segunda manifestación de una mala cohesión en el hormigón proyectado se produce cuando es proyectado sobre el sustrato. En este caso los problemas de cohesión pueden conducir a desprendimientos de hormigón desde superficies proyectadas sobre cabeza o a deslizamiento del hormigón proyectado en las paredes.

Una cohesión inadecuada, que conduce a desprendimientos, puede ser causada por:

- > Un diseño pobre de la mezcla. El uso de agregados bien graduados con buenas características de forma y una cuidadosa atención a las fracciones finas ayudará a la cohesión, pero puede no ser suficiente para superar los problemas de cohesión si el hormigón tiene agua en exceso.
- > Una escasa cantidad de cemento. En algunos casos el cemento por sí solo puede no ser suficiente para crear una mezcla cohesiva, por lo que debe considerarse la inclusión de materiales finos complementarios como la microsílíce u otros materiales similares. La finura del cemento también afecta a la cohesión y a la demanda de agua, por lo que debe ser monitoreada.
- > Una baja dosificación del acelerante. Los acelerantes de fraguado son esenciales cuando se proyecta sobre la cabeza, pero opcionales para las superficies verticales. No solo debe ser una dosis adecuada la que se utilice para mantener hormigón proyectado en su lugar sobre la cabeza, si no que se requiere un acelerante que sea químicamente compatible con el cemento. Si el acelerante es químicamente incompatible o la temperatura del hormigón es demasiado baja, entonces puede no

ocurrir la rigidización de la mezcla y dar como resultado una mala cohesión.

- > Una dosificación irregular del acelerante puede conducir a la formación de lentes de hormigón sin acelerante dentro del revestimiento, los que carecen de la cohesión del hormigón proyectado que si tiene acelerante de fraguado. Este problema se ve agravado con el uso de estabilizadores de hidratación ya que puede llevar a que estos lentes de hormigón permanezcan fluidos y sin cohesión durante un largo período después de la proyección. Los métodos para dispersar los acelerantes de fraguado de manera uniforme en una corriente de hormigón dentro de la tobera se describen en la sección de maquinarias.
- > La fluidez excesiva puede agravar los problemas de cohesión. La cohesión generalmente disminuye a medida que aumenta el cono, así un hormigón excesivamente fluido puede estar propenso a rupturas internas que conducen a desprendimientos. Un alto contenido de humedad dentro de una mezcla puede dar lugar a una exudación interna que hará que se pierda la cohesión por lo que debe evitarse. El uso de un incorporador de aire para dar trabajabilidad en la mezcla antes de la proyección en lugar de confiar exclusivamente en el agua o un aditivo reductor de agua es uno de los medios que mejora la cohesión de un hormigón bien colocado. Sin embargo, el exceso de aire atrapado debe ser eliminado mediante una compactación adecuada durante la aplicación y se debe tomar las medidas necesarias para asegurar que esto se logre. Es necesario tener cuidado cuando se utiliza este enfoque para mejorar la cohesión y se debe considerar la asesoría de un experto.
- > La cohesión del hormigón proyectado puede ser mejorada por la inclusión de 1 a 2 kg/m<sup>3</sup> de micro fibras sintéticas. Las fibras deben tener un diámetro en el rango de 18 a 35 micras y una longitud de aproximadamente 12mm. La incorporación de estas fibras a la mezcla antes de la agitación dará lugar a una cierta pérdida de docilidad la que no debe ser compensada con adición de agua. El adicionar un superplastificante adecuado ó entre un 8 a 15% de aire a través del uso de un incorporador de aire para recuperar el cono perdido generalmente dará como resultado características de proyección que serán similares o mejores que el hormigón original sin micro fibras.

La cohesión se evalúa mejor en terreno a través de la proyección (una antigua técnica) de un cono invertido de hormigón en una superficie sobre cabeza sin el uso de acelerante. La proyección se debe continuar hasta que el cono de hormigón se despenda, después de lo cual se puede estimar la máxima capacidad de acumulación antes de la falla. Un hormigón de baja cohesión será capaz de lograr una capacidad máxima de sólo 50 mm, normalmente la cohesión del hormigón se encuentra entre 100 – 120 mm y un hormigón altamente cohesivo puede lograr al menos 150 mm de acumulación antes de desprendimiento. Si la capacidad de acumulación

está limitada por una falta de cohesión, las capacidades de acumulación arriba mencionadas suelen aumentar a medida que el asentamiento del hormigón se reduce y aumentan sustancialmente cuando se añade un acelerante de fraguado. La experiencia ha demostrado que la falla por adherencia limita la capacidad máxima de acumulación entre 250 a 300 mm, incluso para el mejor hormigón proyectado independientemente del asentamiento y del uso de acelerantes de fraguado.

### 5.7.3 Líneas de transporte vertical

Las líneas de caída se utilizan en algunas minas subterráneas profundas para proporcionar una transferencia eficiente de hormigón proyectado desde la superficie hasta los niveles más bajos de trabajo en la mina. Por ejemplo, en Mt Isa Mine, Australia, el hormigón puede ser colocado hasta 1700 m. de profundidad. Normalmente, el hormigón proyectado se entrega en la línea de caída en la superficie en un camión mezclador convencional y se recoge bajo tierra en un camión agitador subterráneo.

Aspectos clave para el diseño de línea de caída son:

- > El diámetro varía desde 150 hasta 225 mm, con 200 mm se considerado como un valor normal
- > El tubo vertical debe estar conectado sin curvaturas o desviaciones para evitar el desgaste irregular
- > El diseño de la batea de remezcla en la base de la línea de caída

Hay dos tipos de líneas de descarga vertical: flujo con pistón y caída libre. En el flujo con pistón, la mezcla mantiene su cohesión y no segrega. Esto es esencial cuando la descarga del hormigón se hace directamente a una estructura (es decir, revestimiento de piques). En este caso se requieren líneas de menor diámetro (150 mm o menos) y el control del asentamiento es fundamental. El riesgo de bloqueo de la línea es relativamente alto con este método. En el método de entrega de caída libre, los materiales segregan a medida que viajan por el tubo, pero se remezclan en una batea en la base al final de la caída. La batea es esencialmente un tubo con un extremo abierto y está fabricado con una sección gruesa de acero debido a la fuerte abrasión a que está sometida.

Las líneas de caída en las minas Australianas utilizan el método de caída libre para minimizar el riesgo de bloqueos, ya que son costosos de reparar. En general se recomienda un asentamiento mínimo de 180 mm y la mezcla se estabiliza para asegurar al menos 6 a 8 horas de vida útil. Las fibras pueden ser añadidas antes de la transferencia, pero algunas minas, por temor a bloqueos, deciden añadir las fibras durante el mezclado dentro de la mina. En este sentido, las fibras de polipropileno proporcionan menos abrasión en el tubo de caída.

Es esencial cebar la línea antes de su uso. La gran área superficial de la pared de la tubería puede retener una película de agua

suficiente para alterar radicalmente la relación agua/cemento de la mezcla. Esto se puede superar mediante el cebado de la línea con alrededor de 0.2 m<sup>3</sup> de hormigón proyectado que se descarta posteriormente. La instalación receptora subterránea debe estar diseñada para hacer frente a este tipo de residuos. Si la línea se utiliza continuamente (por ejemplo una carga cada 2 - 3 horas) y se utilizan niveles suficientes de estabilizador de fraguado, entonces no se requiere lavar la línea entre cargas. Sin embargo, es esencial que se lave la línea a fondo en cada detención de la transferencia y al final del turno. El tubo debe mantenerse libre de acumulaciones, fugas y desgastes.



# 6

## CAPÍTULO

### Máquinas y Equipos para Shotcrete

#### 6.1 Generalidades

La selección de los equipos de hormigón proyectado depende de numerosos factores:

- 1.- Especificación del proyecto.
- 2.- Tipo de aplicación.
- 3.- La velocidad de colocación del hormigón proyectado.
- 4.- Los tiempos disponibles para la proyección del hormigón.
- 5.- Tipo de proceso de hormigón proyectado (húmedo o seco).
- 6.- El acceso al sitio o sitios y el tamaño físico del frente de trabajo para determinar la viabilidad de varias configuraciones de equipos de hormigón proyectado.
- 7.- Disponibilidad y calidad de los materiales de la zona.
- 8.- El sistema de suministro de hormigón, incluyendo distancia de transporte.

Una disposición básica de equipos para la proyección de hormigón por vía húmeda por lo general consiste en una bomba de hormigón, compresor, boquilla y la línea de descarga. Para la proyección de hormigón por vía seca el equipamiento básico incluye una cámara de presión, compresor, boquilla y la línea de descarga. En los últimos años la tecnología en equipos de hormigón proyectado ha avanzado hasta un nivel que ahora incluye proyección vía control remoto, bombas dosificadoras de acelerante de fraguado integradas, compresores a bordo del equipo de proyección, instalaciones de hidrolavado, etc.

La configuración seleccionada para el equipo debe ser capaz de descargar la mezcla dentro del tubo de suministro, bajo un exhaustivo control de calidad y entregar en la boquilla un flujo continuo de material mezclado de manera uniforme y a una velocidad adecuada.

Como guía, el volumen de colocación de hormigón proyectado de forma manual está entre 3 y 10 m<sup>3</sup>/hora. La capacidad de mezclado de los equipos para hormigón proyectado con mezcla seca está entre 1 y 5 m<sup>3</sup>/hora y en el caso de hormigón proyectado con mezcla húmeda entre 3 y 25 m<sup>3</sup>/hora. Debido

a la gran variedad de equipos disponibles, es importante siempre remitirse a las especificaciones de funcionamiento del fabricante del equipo.

#### 6.2 Equipo para mezcla seca

##### 6.2.1 Generalidades

Los equipos para hormigón proyectado de mezcla en seco se pueden dividir en dos tipos, ya sean máquinas de cámara simple o doble y máquinas de alimentación continua, generalmente llamadas máquinas rotatorias.

##### 6.2.2 Máquinas de cámara simple o doble

Las máquinas de una sola cámara tienen un funcionamiento intermitente, operan colocando el material en la cámara esta se cierra y se presuriza con aire haciendo que el material se introduzca en el tubo de descarga. Cuando la cámara está vacía se despresuriza, se rellena y se repite la operación (Figuras 6.1 y 6.2).

Las máquinas de doble cámara permiten una operación más continua mediante el uso de la cámara superior como una compuerta de aire durante el ciclo de alimentación de material.

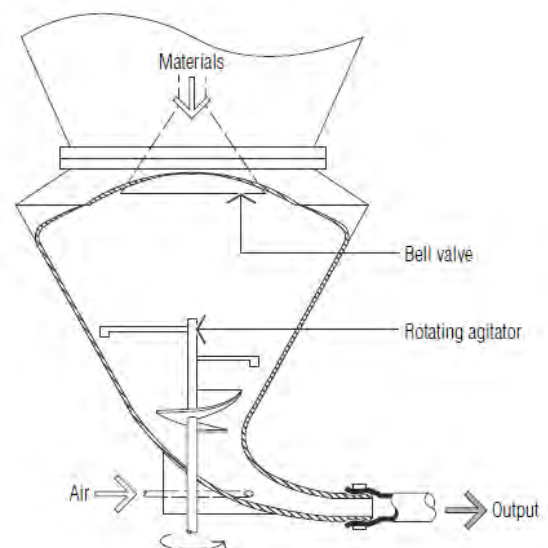


Figura 6.1 Equipo de bombeo para shotcrete vía seca de una cámara.



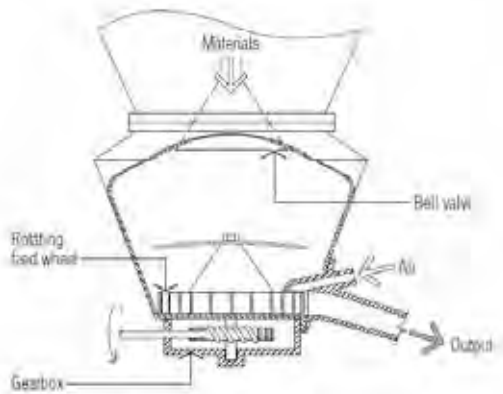


Figura 6.2 Equipo de bombeo para shotcrete vía seca de doble cámara.

### 6.2.3 Máquinas rotatorias

En general, existen dos tipos de máquina rotatorias disponibles. La máquina rotatoria de rotor o revolver (figuras 6.3, 6.4a y 6.4b) utiliza discos de sellado en la parte superior e inferior del elemento giratorio. El material es alimentado por gravedad desde la tolva dentro de las cavidades del rotor en un área de su plano de rotación y se descarga hacia abajo desde estas cavidades con la presión de aire en el punto opuesto en su rotación. Se introduce aire adicional en el cuello de salida para lograr un adecuado volumen y presión de suministro de material hacia la tubería de salida.

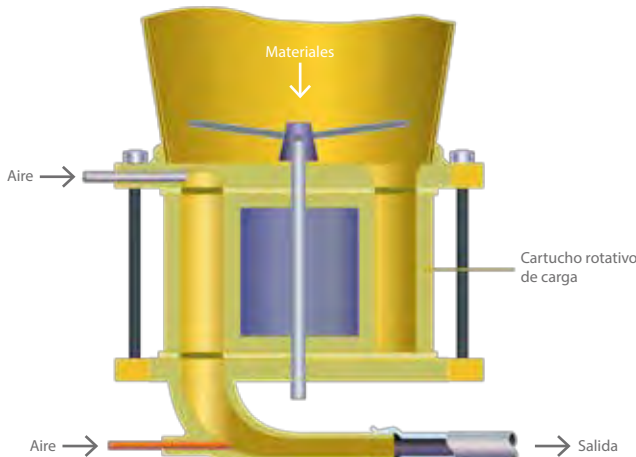


Figura 6.3 Detalle de bomba con "barril de carga" rotatorio y bombeo neumático.



Figura 6.4b Otro modelo de equipo de shotcrete para vía seca del tipo rotatorio.

La máquina de plato rotatorio (Figuras 6.5 y 6.6) utiliza un segmento sellado en la superficie superior del elemento giratorio. El material es alimentado por gravedad desde la tolva en la parte superior hacia las cavidades en forma de U del rotor y descargado en el cuello de salida cuando esa cavidad en particular está alineada bajo el segmento sellado, se inyecta aire hacia abajo conduciendo el material a la manguera.

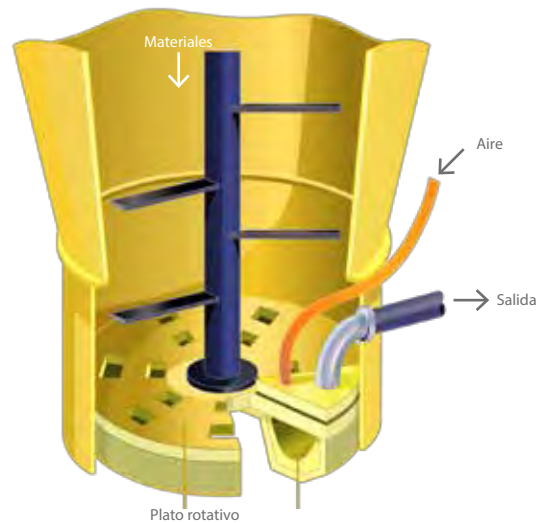


Figura 6.5 Detalle operación y composición del equipo de shotcrete con "plato rotatorio" para vía seca.



FIG. 6.4 Equipo Meyco Piccola de shotcrete para vía seca.



Figura 6.6 Equipo de shotcrete vía seca con "plato rotatorio".



Algunas máquinas rotatorias se modifican para manejar tanto mezcla húmeda como en seco, para esto no se necesita ninguna conversión especial ni se usan accesorios adicionales.

### 6.3 Equipo para mezcla húmeda

Los equipos de hormigón proyectado para mezcla húmeda se pueden definir como un equipo de desplazamiento positivo o máquinas neumáticas.

Las máquinas de desplazamiento positivo constituyen la mayor parte del mercado y pueden ser de pistones propulsados hidráulica o mecánicamente con una variedad de válvulas de ciclos y dispositivos reductores de movimiento de los líquidos (Figura 6.7) o pueden ser bombas de compresión de tipo peristáltico mediante rodillos mecánicos para arrastrar el hormigón a través de un tubo de impulsión (Figura 6.8). Además se usan bombas de tornillo sin fin (bombas de rotor / estator) que utilizan piezas metálicas conocidas como "cuchillas" que obligan a la mezcla a salir través de un tubo. Este tipo de bomba se utiliza principalmente para la aplicación de mezclas de estuco o yeso incorporando agregados finos generalmente hasta 4 mm, pero puede permitir hasta 8 mm con una apropiada configuración de la bomba (Figura 6.9). Todas estas máquinas de desplazamiento positivo incorporan aire comprimido en la boquilla para aplicar el hormigón neumáticamente.

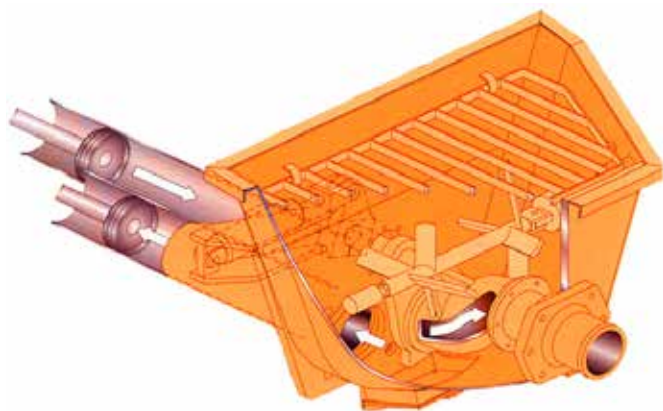


Figura 6.7 Detalle de bombeo de mezcla húmeda con desplazamiento positivo por pistón.

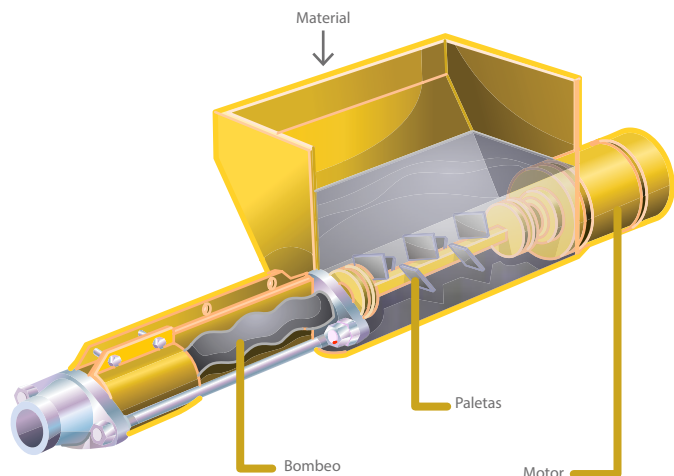


Figura 6.8 Detalle de equipo para vía húmeda de tornillo sin fin (del tipo "mono").

## 6.4 Equipos auxiliares

### 6.4.1 Equipos de control remoto

Los equipos de proyección de hormigón con mando a distancia se utilizan para mejorar la seguridad y la productividad de los operadores, debido a que:

- 1.- Mantienen al operador alejado de suelo sin soporte.
- 2.- Reducen al mínimo la exposición al rebote y el polvo.
- 3.- Permiten el acceso a zonas difíciles.
- 4.- Son menos exigentes físicamente que la proyección manual.
- 5.- Aumentan la productividad mediante un mayor rendimiento volumétrico.

El equipo generalmente consiste en un brazo giratorio telescópico con la boquilla montada en este y la bomba de hormigón montada en un vehículo móvil, mientras que el operador controla los movimientos de la bomba y del brazo con un control remoto (Figuras 6.9, 6.10 y 6.11).



Figura 6.9 Operador con control a distancia de la proyección.



Figura 6.10 Equipo controlado por vía remota para aplicaciones de minería subterránea.



Figura 6.11 Equipo de proyección usado en obras de minería subterránea y obras civiles e infraestructura.

### 6.4.2 Bombas y sistemas de dosificación de acelerantes

Se pueden utilizar varios tipos de bombas cuando se dosifica el acelerante. El tipo de bomba es importante debido a la necesidad de tener un volumen de alimentación regular y preciso. Típicamente los dos tipos de bombas utilizadas para lograr esto son bombas “del tipo mono” o bombas peristálticas. La capacidad de la bomba de dosificación también es importante, ya que puede ser necesaria una tasa de hasta el 10% del contenido de cemento por metro cúbico de hormigón proyectado.

La dosificación exacta es importante y algunas placas de control del equipo de hormigón proyectado han integrado sistemas computarizados que controlan y supervisan las dosis de acelerante.

Estas unidades (en equipos más modernos) se incorporan en los sistemas de control del hardware de los equipos de hormigón proyectado. La Figura 6.12 describe los modelos y ubicación típica de estas bombas de aditivo.



Figura 6.12b



Figura 6.12c

Figura 6.12 Modelos y ubicación de bomba de aditivos del tipo peristáltica y su ubicación en el equipo.

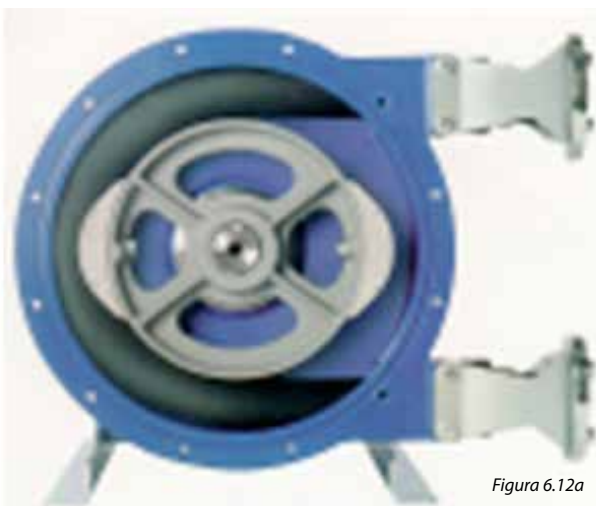


Figura 6.12a

### 6.4.3 Boquillas

El diseño de la boquilla es importante ya que afecta la compactación del hormigón proyectado, el rebote durante la proyección y la consistencia de la mezcla cuando la proyección es en seco. En la mayoría de los casos la mezcla del acelerador se produce en la boquilla de hormigón proyectado y hace más relevante sus características y su mantenimiento o reemplazo en caso de desgaste (Figuras 6.13 y 6.14). En el proceso seco, el anillo de agua y el montaje dentro de la boquilla es fundamental para asegurar la humectación completa de la mezcla (Figura 6.15).





Figura 6.13 Cabezal tipo en un equipo de proyección de hormigón remoto.



Figura 6.15 Tipos de boquillas.

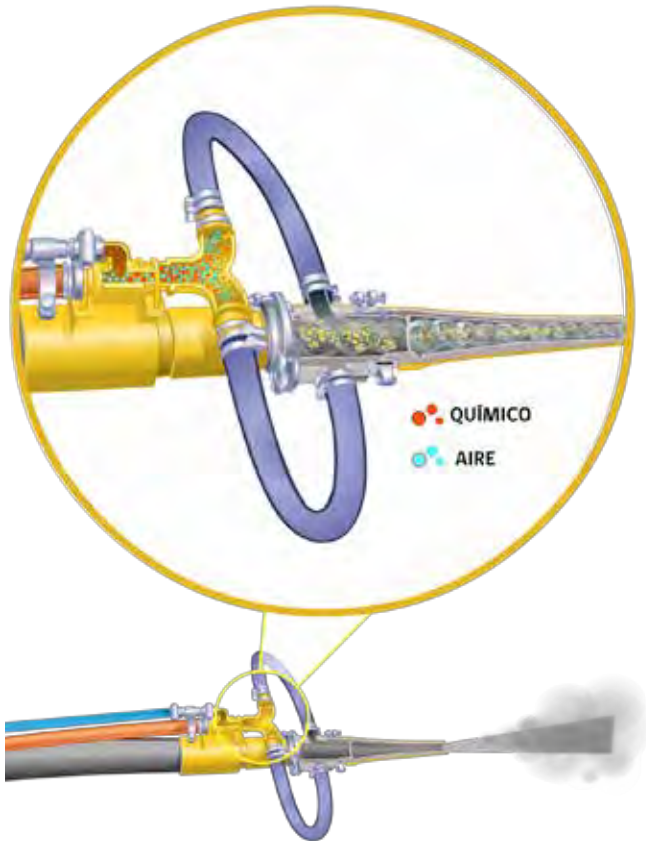


Figura 6.14 Detalle de la función de la boquilla y el ingresos de sus materiales componentes.

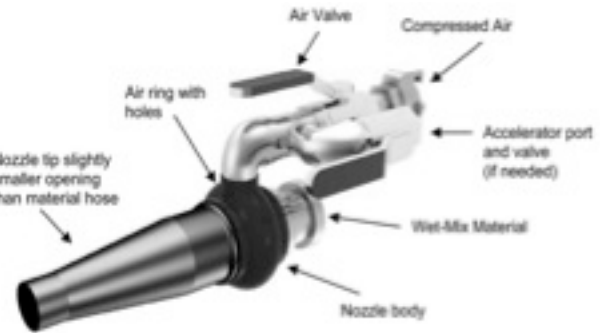


Figura 6.16 Detalle tipo de una boquilla de shotcrete de uso manual.

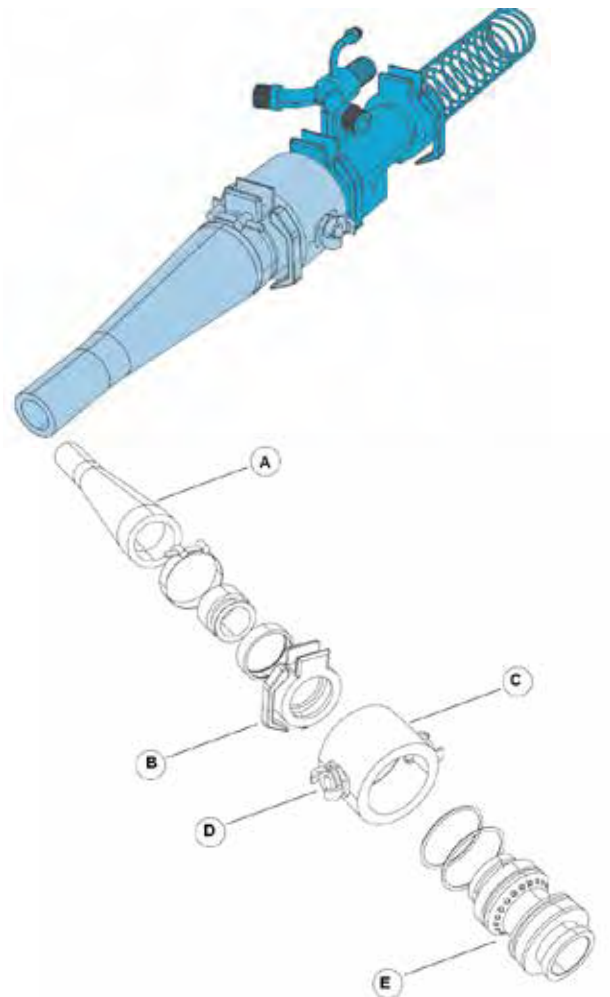


Figura 6.17 Despiece de un cabezal de proyección estándar de la industria y tobera de un equipo de shotcrete. Descripción: A: Tobera de proyección; B: Sello de acoplamiento tipo palanca; C: Camisa cuerpo difusor; D: conexión tipo Chicago (ingreso aire y acelerante); E: Cuerpo difusor (del acelerante y aire de forma tal que envuelva la mezcla entrante).



Figura 6.15a

### 6.4.4 Línea de bombeo para traslado de material (culebrones)

Las líneas de entrega de material están disponibles en varios materiales y diámetros y deben adecuarse al proceso de hormigón proyectado. Se debe tener en consideración la propiedades de los materiales constituyentes, longitud de la línea de suministro, las presiones de trabajo y la cantidad de hormigón requerido. El diámetro interno debe ser un mínimo de 4 veces el tamaño del agregado más grande en la mezcla. Cuando la proyección de hormigón es con fibras de acero en la mezcla, la longitud de la fibra debe ser preferentemente no más de 70% del diámetro interno.

Para las fibras sintéticas este requisito puede relajarse. No obstante, deben realizarse pruebas para asegurar que no se produzcan bloqueos ni de bolas de fibra.

La última sección de la línea de bombeo antes de la boquilla debe ser flexible, tener un tubo resistente a la abrasión, no ser plegable y también ser resistente a dobleces. La especificación de presión en la manguera siempre se debe revisar y debe estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la bomba. Todas las conexiones y acoplamientos o abrazaderas deben estar unidos correctamente y deben contar con medidas de seguridad adecuadas para la protección frente a reventones.

### 6.4.5 Tabla auxiliar de dosificación de aditivos

La Tabla 2 corresponde a un ejemplo de tabla que permite establecer una correlación entre la bomba de hormigón y el

caudal que debe entregar la bomba de aditivo, este caudal debiera ser la "dosis" de aditivo acelerante en función del contenido de cemento de 1m³ de hormigón que se proyectará.

Esta tabla se puede desarrollar en una planilla de cálculo sin mayor dificultad. Requiere establecer en primera instancia como datos de entrada:

- Dimensiones del cilindro o pistón de empuje del hormigón.
- Factor de rendimiento efectivo (asociado al nivel de llenado de cada "pistonada").
- Dosificación del cemento, es decir cuantos kilos de cemento por m³ de hormigón.
- Densidad del acelerante.
- Porcentaje (%) de acelerante respecto al peso del cemento.

Con estos antecedentes se puede configurar, de acuerdo al número de emboladas de la bomba de hormigón, la cantidad de litros que debe entregar la bomba de aditivos. Generalmente se establece un mínimo y un máximo.

Esta tabla se puede omitir, si se realiza de manera correcta la "calibración" de la bomba de aditivos. Equipos computacionales insertos en los equipos de proyección realizan de manera integral la calibración de la bomba de aditivos, pero es necesario verificar esto en forma periódica.

Tabla 2: Ejemplo de bomba de hormigón y acelerante.

TABLA DE RENDIMIENTO BOMBA HORMIGON Y DOSIFICACION ACELERANTE																
Dimensiones del Cilindro		Variables de la Bomba														
Largo	100 cm.	Factor de Rendimiento														
Diám	15 cm.	Dosificación														
Factor	85%	Densidad del Acelerante														
		Emboladas por minuto de la Bomba de Hormigón														
450	Kg. Cemento	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
		Rendimiento efectivo en m3/hora														
1,44	Densid. Acel.	1,80	3,60	5,40	7,21	9,01	10,81	12,61	14,41	16,21	18,02	19,82	21,62	23,42	25,22	27,02
		Dosificación Aditivo en litros/minuto														
1%	Lts./min.	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,66	0,75	0,84	0,94	1,03	1,13	1,22	1,31	1,41
2%	Lts./min.	0,19	0,38	0,56	0,75	0,94	1,13	1,31	1,50	1,69	1,88	2,06	2,25	2,44	2,63	2,81
3%	Lts./min.	0,28	0,56	0,84	1,13	1,41	1,69	1,97	2,25	2,53	2,81	3,10	3,38	3,66	3,94	4,22
4%	Lts./min.	0,38	0,75	1,13	1,50	1,88	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75	4,13	4,50	4,88	5,25	5,63
5%	Lts./min.	0,47	0,94	1,41	1,88	2,35	2,81	3,28	3,75	4,22	4,69	5,16	5,63	6,10	6,57	7,04
6%	Lts./min.	0,56	1,13	1,69	2,25	2,81	3,38	3,94	4,50	5,07	5,63	6,19	6,76	7,32	7,88	8,44
7%	Lts./min.	0,66	1,31	1,97	2,63	3,28	3,94	4,60	5,25	5,91	6,57	7,23	7,88	8,54	9,20	9,85
8%	Lts./min.	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50	5,25	6,01	6,76	7,51	8,26	9,01	9,76	10,51	11,26
9%	Lts./min.	0,84	1,69	2,53	3,38	4,22	5,07	5,91	6,76	7,60	8,44	9,29	10,13	10,98	11,82	12,67
10%	Lts./min.	0,94	1,88	2,81	3,75	4,69	5,63	6,57	7,51	8,44	9,38	10,32	11,26	12,20	13,14	14,07

## 7

## CAPÍTULO

## Dosificación y Mezclado

### 7.1 Dosificación de shotcrete por vía húmeda

El proceso de dosificación consiste en pesar o medir los materiales en masa o volumen de acuerdo a lo especificado. El mezclado es el proceso de combinar los materiales componentes para que se distribuyan de manera uniforme. La agitación es mantener la mezcla en una condición utilizable hasta que se la necesite.

El hormigón y el mortero proyectado deben ser dosificados y mezclados como un hormigón tradicional, en Chile no existe normativa especial para el shotcrete, sin embargo, para esta etapa de dosificación y mezclado las recomendaciones de la NCh170 son en general aplicables. La capacidad de la planta para mezclar uniformemente debe ser establecida a través de ensayos preliminares en laboratorio y luego corroborados en pruebas a escala real, todo esto en la etapa de pre-construcción.

El mezclado puede realizarse por varios métodos, mezclado en planta, con un mezclado por etapas o un mezclado en equipo móvil. Cada uno de estos métodos puede resultar ventajoso dependiendo de las circunstancias y necesidades específicas de la obra y proyecto.

#### > Mezclado en planta

El mezclado se realiza en una planta de hormigón, con sus requisitos técnicos de operación en orden y con un plan de revisión y calibración que no debe ser descuidado. Esta debe estar instalada en ubicaciones de fácil acceso y logísticamente cercano a los puntos de distribución. Los componentes se mezclan completamente antes de la descarga en el equipo de transporte destinado para ello. Para hormigón usado en shotcrete, las plantas de eje vertical del tipo turbo mezclado son las más recomendables (Figura 7.1).



Figura 7.1 Mezcladoras del tipo turbomezclado y planetarias, recomendables para la fabricación de shotcrete por su efectividad.

#### > Mezclado por etapas

Según el proyecto y las condiciones de la faena es probable que sea necesario el mezclado por etapas, es decir, se mezcla parcialmente todos los materiales de la carga en una planta central y se realiza la transferencia a un mezclador móvil, por ejemplo un camión mixer, para la mezcla final antes de la descarga en el punto de colocación. Debe estar sujeta a estudios y pruebas preliminares.



### > Mezclado por equipo móvil

El mezclado del hormigón en equipo móvil consiste en realizar todo el mezclado en un camión donde se cargan todos los materiales componentes en una planta de dosificación centralizada. Este método es el sistema más ampliamente adoptado para la producción de hormigón o de hormigón proyectado.

## 7.2 Dosificación de shotcrete vía seca

La mayoría de los ingredientes secos se suelen mezclar previamente en una planta para ser almacenados en bolsas o son mezclados en una planta de hormigón. El contenido de humedad de la mezcla (previo a que se añada el agua en la boquilla) debe estar entre 2 y 5 % para minimizar la producción de polvo en la bomba de hormigón proyectado. Más de 5 % de contenido de humedad puede causar obstrucciones en la línea.

La manipulación, control de calidad y manejo de estas bolsas de material predosificado es clave para la correcta operación.



Figura 7.2 Almacenaje de bigbag de shotcrete predosificado.

## 7.3 Consistencias de la mezcla

### 7.3.1 Generalidades

El hormigón o mortero requerido para la proyección depende del tipo de equipo de transporte, la distancia de la entrega y el procedimiento de aplicación. Para un contenido de cemento y una relación a/c dada, la consistencia o el flujo se puede ajustar con aditivos químicos añadidos en la planta de mezclado o en sitio.

### 7.3.2 Las fibras y aditivos

Se debe consultar al fabricante o distribuidor de las fibras para elegir los métodos recomendados de adición, que pueden variar entre los tipos de fibras. En sitios de gran tamaño cada

vez es más común el uso de la dosificación automatizada para las fibras, de escasa implementación en Chile.

Se debe dosificar los aditivos de acuerdo con las recomendaciones específicas del fabricante y las pruebas realizadas de acuerdo al tipo de cemento y proyecto en particular. Normalmente los aditivos se dosifican dentro de  $\pm 5\%/ml$  con un equipo de dosificación automática.

### 7.3.3 Temperatura de mezclado

El hormigón proyectado o mortero es muy sensible a la temperatura ambiental durante el mezclado, transporte y proyección. Por lo anterior, las guías de hormigón proyectado internacionales recomiendan no realizar el mezclado si la temperatura de los materiales están por debajo de 5 °C o a más de 35 °C, a menos que se tomen las debidas precauciones. En condiciones fuera de este rango se debiera consultar a un especialista en tecnología del hormigón.

Sin perjuicio de lo anterior, la Guía Austriaca de Hormigón Proyectado<sup>38</sup>, en relación a la temperatura de mezclado de los materiales para vía húmeda hace el siguiente comentario: "El hormigón fresco debe tener una temperatura de más de 15°C. Si la temperatura del hormigón se encuentra por encima de 25°C, antes de la hidratación del cemento puede conducir a una rigidez excesiva de la mezcla fresca, lo que resulta en un comportamiento desfavorable. Las temperaturas menores de 13°C reducen la resistencia temprana y más de 25°C reduce el tiempo de trabajo."

La tabla 7.1 es una recomendación de la temperatura de los materiales para su mezclado y uso óptimo (Guía Austriaca de Hormigón Proyectado<sup>38</sup>).

Las medidas para alcanzar una temperatura de trabajo favorable son:

- A temperatura ambiente baja: calefacción (se debe evitar el vapor directo), almacenamiento bajo cubierta y/o cerrado de los agregados, calefacción del agua añadida para la mezcla.
- A temperatura ambiente elevada: aspersión del árido grueso, almacenamiento cubierto y/o cerrado de agregados, enfriamiento de los materiales constituyentes en casos especiales.

Tabla 7.1 Temperaturas de materiales para shotcrete por vía húmeda (°C)

Temperatura de trabajo	Mínimo	Máximo
Adición de agua	+ 5 (verano 1°C)	+ 60
Áridos	+ 5	-
Mezclas para curva J2	+ 10 (invierno + 15)	+ 30
Mezclas para curva J3	+ 15 (invierno + 20)	+ 30

## 8

## CAPÍTULO

## Despacho

## 8.1 Generalidades

El transporte y entrega implican obtener el hormigón proyectado para el equipo en cantidades adecuadas cuando sea necesario y con el mínimo de tiempo de transporte, esto último es una consideración importante, en particular en la construcción subterránea. Hay muchas maneras de llevar el hormigón proyectado al sitio, por ejemplo en equipos agitadores montados en un camión, líneas de transporte vertical, sacos para mezcla seca, entre otros.

La elección del método de transporte y entrega para hormigón proyectado depende principalmente del proceso de proyección (húmedo o seco), de la accesibilidad, de sistema de manejo de materiales, ubicación de los lugares de trabajo, la demanda de hormigón proyectado por turno.

El transporte del hormigón desde la planta de mezclado hasta el punto de colocación debe realizarse en un equipo móvil que prevenga la segregación, la pérdida de material y la rigidización prematura. Equipos con las aspas de mezclado en malas condiciones no son aptos para esto.

## 8.2 Agitador sobre camión

Cuando la entrega de hormigón proyectado se hace en un agitador sobre camión es necesario que el vehículo proporcione una agitación adecuada. Los equipos o plantas que se identifican como planta de agitación para hormigón no se deben utilizar en el mezclado de hormigón proyectado a menos que se haya demostrado en pruebas de uniformidad de acuerdo a NCh1789 que el equipo o las instalaciones pueden mezclar hormigón proyectado de manera uniforme.



Figura 8.1 Modelos de camión transportador "agitador" (gentileza AtlasCopco y Normet International).



Figura 8.2 Camión transportador "mezclador", ambos de bajo perfil para obras subterráneas.

## 8.3 Descargas verticales

Necesitamos considerar ciertos aspectos al transportar el hormigón proyectado por una línea de acero inclinado o vertical. En general, el diámetro de la línea debe ser de entre 150 a 300 mm, dependiendo del desnivel y consistencia de la mezcla. Dado que el hormigón proyectado es un material abrasivo, se debe verificar las tasas de desgaste debido a la velocidad de caída libre y la fricción asociada.

Antes de utilizar una línea, deberá lubricarse con cemento y lechada o una mezcla adecuada. También se requiere alguna forma de dissipador de energía en el extremo de la línea para controlar la salida del hormigón desde la línea. Esto se logra generalmente usando una batea con un diseño adecuado. La batea puede, si se diseña de esa manera, cumplir la función de un remezclador en caso que se haya producido algo de segregación.

## 8.4 Bombeo

Las bombas de hormigón proyectado se utilizan para transportar hormigón proyectado a través de una tubería o línea a la boquilla. La bomba debe estar en buenas condiciones de operación y con una adecuada mantención.

Se debe tener especial cuidado con el lavado de la bomba y las líneas al final de cada turno.



Figura 8.3 Bomba de uso en shotcrete para traslado de material a distancia.



Figura 8.4 Bomba dispuesta para faena de shotcrete.



# 9

## CAPÍTULO

## Aplicación del Hormigón Proyectado

### 9.1 Generalidades

La aplicación del hormigón proyectado se puede dividir en dos métodos principales, shotcrete manual y shotcrete con equipos robotizados. El shotcrete manual se utiliza generalmente para aplicaciones en la construcción civil y reparación de hormigones. El shotcrete mecanizado se utiliza en aplicaciones de minería y construcción de túneles subterráneos y es ideal para aplicaciones sobre cabeza y en secciones de gran tamaño para taludes y túneles. El shotcrete robotizado, en los casos en los que el acceso y la altura estén dentro del alcance del equipo, puede también ser usado para la estabilización de taludes en minas a cielo abierto. En la construcción de carreteras y ferrocarriles es más común que se adopte el shotcrete manual por las restricciones de espacio y la aplicación en taludes, para esos casos el uso de plataformas elevadoras permiten al pitonero llegar a las zonas más altas y distantes. Hay otros métodos más especializados disponibles para la aplicación mecanizada como los equipos de shotcrete montados en tuneladoras.



Figura 9.1 Los brazos manipuladores tipo anillo (sobre bastidor de la TBM) son unidades independientes que van montadas en el backup de la TBM.

Es esencial el uso de operadores experimentados y competentes que hayan recibido una formación adecuada en la aplicación de hormigón proyectado para garantizar la calidad de cualquier aplicación de shotcrete. Es fundamental considerar cuidadosamente el tipo de equipo, condiciones y requisitos de funcionamiento antes del inicio de la proyección de hormigón. Es esencial contar con personal bien entrenado de preferencia certificado y, más importante aún, con un supervisor técnico o profesional competente y experimentado en terreno.

### 9.2 Servicios

#### 9.2.1 Electricidad

Para los equipos que así lo requieran debe proporcionarse una fuente de alimentación eléctrica confiable con toma de tierra. Para otros equipos debemos tomar en consideración los ciclos de trabajo y el uso de fuentes eléctricas.

#### 9.2.2 Agua

La calidad del agua y su temperatura afectan el comportamiento del hormigón proyectado. El agua debe ser potable y con una temperatura por lo general de 18 a 25°C. También es importante contar con un suministro de presión de agua adecuado y la disponibilidad suficiente para aplicaciones particulares como el curado, la limpieza o la preparación del sustrato.

Otras consideraciones:

- > Agua de amasado: idénticas precauciones que en hormigones tradicionales (NCh1498).
- > En caso de sospechas respecto a la calidad del agua, realizar un análisis físico químico y realizar pruebas comparativas con agua potable.
- > Cuidado con la presencia de aguas sulfatadas o con cloruros.
- > Si aún hay dudas, considerar la recomendación del ACI318<sup>1139</sup> punto 3.4.3.

#### 9.2.3 Iluminación

La iluminación es importante para mejorar la seguridad y ayuda en el frente de trabajo a los operadores de equipos de shotcrete a proyectar un producto de calidad con el espesor correcto y a disminuir el rebote por falta de visibilidad.

#### 9.2.4 Ventilación

Todas las áreas cerradas deben estar bien ventiladas debido al polvo, humos y otros contaminantes en el aire creados por los equipos durante el proceso de aplicación de hormigón

proyectado. En las aplicaciones de minería subterránea es esencial una ventilación de calidad para diluir y eliminar los humos de maquinaria en otras operaciones, además del polvo y sustancias químicas en suspensión en la zona de proyección de shotcrete.

### 9.2.5 Aire comprimido

Se necesita un suministro constante de aire comprimido limpio y seco con la presión y el volumen adecuado. El suministro depende de la especificación de un equipo en particular, el estado de los equipos, las condiciones de operación en el lugar, la longitud y diámetro de manguera.

Se puede tomar como requisitos típicos del aire:

- Para proyección de hormigón húmedo el consumo de aire es de aproximadamente 12 m<sup>3</sup>/minuto (425 pies cúbicos por minuto - cfm) a una presión de aproximadamente de 6 a 7 bar (88 - 102 psi).
- Para proyección de hormigón vía seca el consumo de aire es de aproximadamente 15 m<sup>3</sup>/minuto (530 pies cúbicos por minuto - cfm) a una presión de entre 3 a 6 bar (44 - 88 psi aprox.).

## 9.3 Formación y entrenamiento

La formación y entrenamiento del personal para los trabajos de hormigón proyectado es esencial.

La clave del éxito del hormigón proyectado es la colocación de manera correcta, ya sea por el proceso manual o robotizado, por vía húmeda o vía seca. Debe ser un operador entrenado quien dirija y controle la colocación del shotcrete bajo la supervisión de un profesional debidamente acreditado para supervisar dicha faena. También debe tener un conocimiento profundo de la operación, los requisitos de mantenimiento y de los procedimientos de seguridad de los equipos además de conocer los requisitos de calidad del proyecto. En Oceanía y Europa hay cursos formales para la formación o capacitación de los operadores. Sin embargo, algunos contratistas de proyección de hormigón ya han desarrollado sus propios programas e iniciativas por los cuales certifican bajo estos programas internos al personal tras ser entrenado por operadores con gran experiencia y formación para shotcrete manual y robotizado.

La práctica en América del Norte está basada en los programas de certificación para shotcrete manual ("Shotcrete Nozzleman Programs") auspiciados por ACI (American Concrete Institute) y desarrollados por ASA (American Shotcrete Association), en el que están claramente establecidos el programa de estudios y el proceso de certificación de competencias.

En Europa, desde el año 2009 EFNARC tiene y administra un programa de certificación de operadores para equipos robotizados por vía húmeda con especial énfasis en faenas subterráneas.

Para los últimos dos casos, ACI-Shotcrete Nozzleman y EFNARC, el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH) posee instructores y programas de instrucción y certificación permanentes.

## 9.4 Seguridad

### 9.4.1 Generalidades

Es necesario que las regulaciones específicas de salud y seguridad ocupacional se cumplan sin excepción. En particular, los siguientes tópicos se deben revisar como mínimo:

- > Competencia y formación de los operadores y el personal.
- > Inducciones legales y de la industria minera o del mandante, en temáticas de responsabilidad, seguridad y operación entre otros.
- > inducciones del sitio de trabajo, charlas y capacitaciones necesarias.
- > El plan de seguridad completo debe estar en el lugar de trabajo e incluir al menos los siguientes puntos:
  - Las evaluaciones de riesgos.
  - Seguridad en el trabajo y análisis del medio ambiente.
  - Declaraciones de método de trabajo seguro.
  - Programa de limpieza y manejo de residuos.
  - Programa de mantenimiento de equipos.
  - Manejo de herramientas y equipos.
  - Procedimientos de trabajo referentes a la calidad del sustrato (roca o suelo), en especial en la tipología en la frente de trabajo.
  - Requisitos y manipulación de los productos químicos en uso.
  - Identificación de equipos de movimiento.
  - Manejo de explosivos y gases.
  - Identificación de los inspectores y supervisores y programa de muestreo e inspecciones en terreno.

### 9.4.2 Recomendaciones mínimas de protección del personal

El prevencionista debiera realizar una evaluación de riesgos e informar a los operadores y entono de trabajo adyacente que el hormigón proyectado va a ser un proceso ruidoso y sucio. El pitonero u operador, el encargado del camión mixer o de entrega de hormigón, el operador asistente o cuadrilla deben ser instruidos y advertidos del uso del EPP apropiado. Este equipo incluirá botas de seguridad, overol, guantes, casco de seguridad, protector auditivo, protección para la cara (máscara del tipo "full-face" incluye trompas de respiración), lámpara, auto rescatador. Este equipo debe ser reemplazado cuando está dañado o desgastado.



El área de trabajo en torno a la proyección debe quedar protegida del rebote, del polvo de cemento y de producto químico en suspensión, por todo ello se requiere el uso permanente de máscaras aprobadas contra el polvo, respiradores y protección para ojos y oídos. Debido a la naturaleza irritante del cemento húmedo y diversos productos químicos utilizados en el hormigón proyectado, es necesaria la protección de la piel (Ver capítulo sobre seguridad y salud).

## 9.5 Shotcrete manual

### 9.5.1 Sustrato y preparación de la superficie

#### 9.5.1.1 Generalidades

La preparación de la superficie requerida depende de la condición y naturaleza del sustrato contra el cual se va a colocar el hormigón proyectado. En todos los casos que existan flujos o ingresos de agua que puedan interferir con la aplicación del hormigón proyectado o causar escurrimiento de lechada, previo a la proyección, estas vías de agua debes ser selladas, o el agua debe ser desviada por medio de tuberías, alcantarillas, desagües, etc, hacia lugares desde donde pueda ser evacuada.

En la construcción subterránea, a menudo se utiliza una preinyección en varios estratos mediante lechadas de cemento o químicos para prevenir el ingreso de agua. Lo más importante es que todos los sustratos o superficies deben estar limpias, libres de polvo, aceite, agua excesiva y otros contaminantes que puedan interferir en la adherencia del shotcrete. La aplicación de un sello superficial sobre el sustrato, cuando este no sea de acero o un moldaje impermeable, puede ser de gran ayuda para minimizar la pérdida de humedad en el hormigón proyectado.

A continuación se entregan recomendaciones particulares para diferentes superficies.

#### 9.5.1.2 Moldajes

Moldajes no rígidos. Los moldajes no rígidos se utilizan cuando la apariencia de la parte posterior de un elemento donde se desea aplicar hormigón proyectado no sea importante. Ejemplos de esto son elementos como una malla fina de metal expandido o tejida. Esta debe fijarse sólidamente a un marco de respaldo y estar tensa para minimizar la vibración o el "aleteo" de manera que se evite el escurrimiento del hormigón y se pueda lograr una buena compactación.

Moldajes rígidos. Las maderas o aceros usados para moldajes deben ser recubiertos por un agente desmoldante con el propósito de evitar la absorción de humedad y adherencia de hormigón proyectado. Este moldaje debe estar debidamente apoyado para evitar la vibración excesiva y la deflexión de las placas.

Una lámina de polietileno estirada sobre el moldaje también puede proporcionar una superficie de separación. La madera

contrachapada generalmente es adecuada como moldaje rígido y en general la proyección sobre este tipo de elementos no reviste gran dificultad, especialmente cuando se construyen o reparan elementos tales como pilares o similares. El uso de materiales de caras lisas solo necesita ser considerado cuando se requiera de una buena cara de terminación para el hormigón.

#### 9.5.1.3 Otras superficies

- > **Superficies de tierra.** La gama de aplicaciones de hormigón proyectado para cubrir superficies de suelo son amplias e incluyen piscinas, estabilización y protección de taludes, revestimiento de canales, canales abiertos, depósitos, etc. Es esencial una adecuada compactación y preparación de la tierra para prevenir la erosión durante la aplicación. La superficie de suelo se corta al nivel que se desea para proporcionar un apoyo adecuado y para garantizar el espesor de diseño del shotcrete. Se puede instalar una barrera contra la humedad para impedir el movimiento de la humedad del hormigón proyectado recién colocado hacia el suelo. Se recomienda especial cuidado en la secuencia de aplicación o la aplicación de una primera capa rápida para evitar que el hormigón se deslice sobre la superficie. Ver Figura 9.2.
- > **Superficies de roca.** El sustrato debe estar libre de rocas sueltas, polvo y películas superficiales (como aceites). En general, esto se puede lograr mediante el uso de una combinación de un chorro de agua y aire comprimido. También se puede considerar el uso de un chorro de arena húmeda. En los túneles subterráneos y minas, esta limpieza o "scaling" a menudo se realiza por medios mecánicos o con un chorro de agua a alta presión (hydro scaling) para quitar las rocas sueltas. La limpieza debe comenzar desde la parte superior del frente de trabajo hacia abajo.
- > **Moldajes de madera.** Si los moldajes deben ser retirados después de su uso debe usarse un agente desmoldante previo a la proyección para evitar la absorción de humedad y para inhibir la unión entre el hormigón proyectado y el moldaje.
- > **Superficies de acero.** Antes de aplicar el shotcrete sobre superficies de acero se debe eliminar todo rastro de oxidación, aceites, pinturas u otro contaminante, para ello es recomendable un chorro de arena u otros métodos apropiados.
- > **Superficies de shotcrete/hormigón.** Todas las superficies sueltas, agrietadas o deterioradas deben ser retiradas hasta llegar al hormigón sano. Se debe utilizar un chorro de agua, picardo u otros medios mecánicos para eliminar cualquier hormigón contaminado, desde químicos, aceites a residuos de corrosión. Cuando la armadura está expuesta, esta debe estar libre de óxido suelto u otras materias perjudiciales que pudieran afectar la

durabilidad y la adherencia. Si se requiere se puede aplicar una lechada o puente de adherencia a la superficie. Cuando el hormigón proyectado va a ser colocado

contra una superficie de hormigón lisa, esta debe ser erosionada y/o picada utilizando cualquiera de los métodos mecánicos antes mencionados.

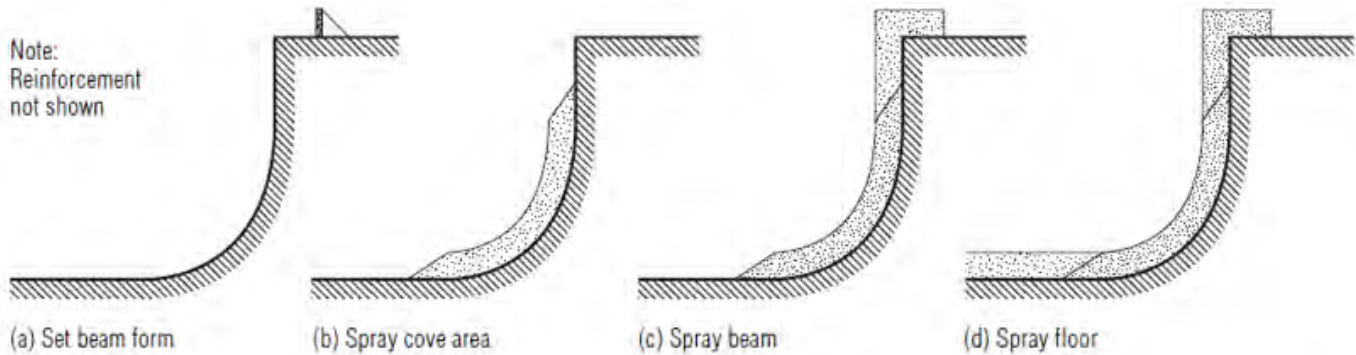


Figura 9.2 Una secuencia cuidadosa al aplicar shotcrete de forma directa sobre el suelo, en casos tales como piscinas y taludes, permite prevenir el deslizamiento del hormigón, tal como se aprecia gráficamente.

- > **Albañilerías.** Requieren una preparación similar a la de superficies de hormigón. La absorción de humedad de la albañilería es normalmente alto por lo que es esencial un humedecimiento previo.
- > **Superficies congeladas.** En general no debe proyectarse hormigón en esta condición, especialmente cuando se requiere de adherencia y de un fraguado rápido.

el pronóstico sea de lluvia inminente. En sitios expuestos, el hormigón proyectado fresco debe protegerse contra la lluvia. Las lluvias fuertes que caen sobre hormigón recién colocado pueden comprometer su apariencia y reducir la resistencia final de la superficie y por ende su durabilidad.

## 9.5.2 Procedimiento de proyección del shotcrete

### 9.5.2.1 Temperatura en el punto de aplicación

El hormigón o mortero proyectado no debe aplicarse si la temperatura en el momento de la colocación es inferior a 5°C o más de 35°C, a menos que se hayan tomado las precauciones adecuadas. Cuando sea necesario proyectar fuera de este rango se aconseja buscar un especialista en tecnología del hormigón que realice las recomendaciones para esos casos para alcanzar los resultados deseados.

### 9.5.2.4 Puesta en marcha

Una vez que el personal de la faena y el equipo se han establecido en el área de trabajo junto a los materiales, es necesario revisar las conexiones de las tuberías de transporte de hormigón, la conexión de mangueras de aire y evaluar que la presión de aire sea la correcta. La mayoría de las máquinas de hormigón proyectado disponen de un tablero central que permite realizar estas mediciones y observaciones. Las tuberías y líneas flexibles deben estar limpias y deben ser conectadas con el menor número posible de curvas y sin dobleces o torceduras, además el reductor debe estar ubicado lo más cerca posible del punto de descarga de la bomba.

### 9.5.2.2 Condiciones de viento o corrientes de aire

Las condiciones meteorológicas con viento pueden ser difíciles para proyectar hormigón. Si se requiere realizar la faena en estas condiciones es necesario colocar una pantalla cortaviento que proteja la boquilla, el chorro y la superficie a proyectar y que impida que el material escape fuera de la dirección deseada. Se debe dar especial atención a la pasta o "niebla de partículas" que puedan viajar fácilmente con el viento y caer en superficies circundantes.

Después de verificar los equipos, los conductos de suministro de la bomba a la boquilla deben quedar correctamente asegurados y totalmente lubricados con lechada de cemento o un lubricante aprobado. En ningún caso se puede usar productos derivados del petróleo para lubricar las líneas.

Los vientos y las corrientes de aire también promueven la formación de grietas en el hormigón fresco por secado rápido, en lo posible se deben usar pantallas cortaviento y retardadores de evaporación para proteger el hormigón. Se deben aplicar los procedimientos de curado tan pronto como sea posible.

A la mezcla suministrada se le debe verificar el tiempo de mezclado y el asentamiento antes de descargarla a la bomba. En mezclas de shotcrete con acelerante, no se debe proyectar el hormigón hasta que este exhiba el comportamiento de fraguado adecuado para el proyecto y que además se haya calibrado la dosis del acelerador en la boquilla correctamente.

### 9.5.2.3 Condiciones de lluvia

A menos que exista una protección adecuada, el hormigón proyectado no debe colocarse durante una lluvia o cuando

Esta operación se lleva a cabo normalmente en un área de prueba previamente designada, normalmente a un costado de la proyección. Posteriormente el operador debe revisar que la presión y volumen de aire sea la correcta y ajustarla de ser necesario a lo requerido por el proyecto.

### 9.5.2.5 Técnica de shotcrete manual

La distancia desde la boquilla a la superficie receptora debe estar entre 0.6 a 1.0 m con el fin de lograr el mayor grado de compactación y el menor rebote. La distancia óptima está influenciada por el tamaño del agregado, la curva granulométrica, el acabado superficial requerido, la presión del aire y la velocidad del material transportado. La boquilla debe ser dirigida perpendicular al sustrato en todo momento. La manipulación de la boquilla para colocar hormigón proyectado durante la proyección debe ser con un movimiento de forma circular a ovalada (Figura 9.3).

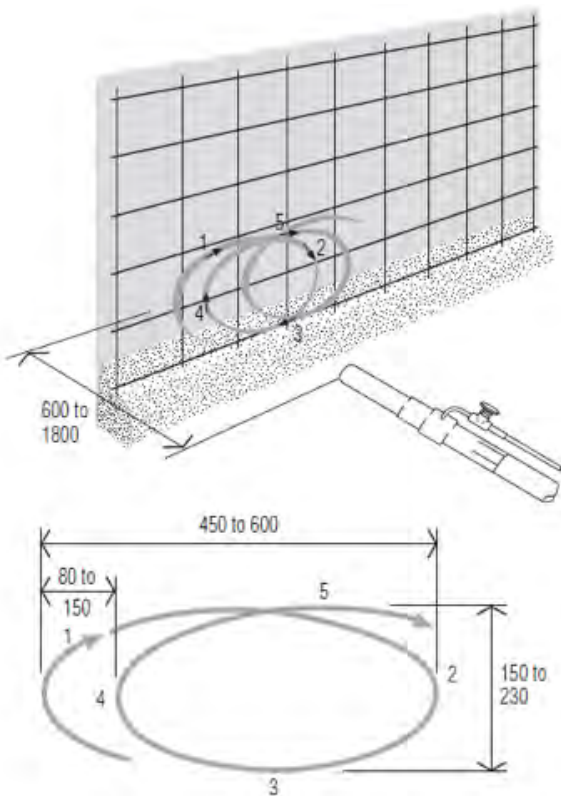


Figura 9.3: Aplicación de shotcrete en forma circular, su principal ventaja, minimiza la incorporación de rebote en la proyección.

El pitonero debe primero rellenar todos los desniveles y quiebres que existan, zonas de debilidad tales como fisuras, fallas, zonas de grava y partes blandas si corresponde (este proceso se limita normalmente a superficies de roca o suelo). La proyección debe comenzar desde las secciones inferiores y moverse metódicamente hacia arriba (Figura 9.5). La dosis de uso del acelerante puede incrementarse marginalmente cuando la aplicación pasa desde la base hasta la pared y luego al techo (contra bóveda, hastial y bóveda). En algunos casos, puede ser prudente aplicar una serie de capas más delgadas en vez de intentar proyectar todo el espesor en una sola pasada de la boquilla.

Cuando se aplican capas gruesas es importante que la superficie superior se mantenga a una inclinación de aproximadamente 45° (Figura 9.6). Es importante que no se produzca hundimiento o deslizamiento del hormigón proyectado y se debe tener cuidado de no incorporar en la pared el rebote acumulado en la base.

El hormigón proyectado debe surgir en un flujo ininterrumpido constante, en caso de que el flujo se haga intermitente, el operador debe dirigir la boquilla lejos de la zona de colocación hasta que el flujo se haga uniforme. Se debe proteger de las salpicaduras las superficies contiguas que no serán proyectadas. El exceso de shotcrete en estas superficies adyacentes debe ser eliminado.

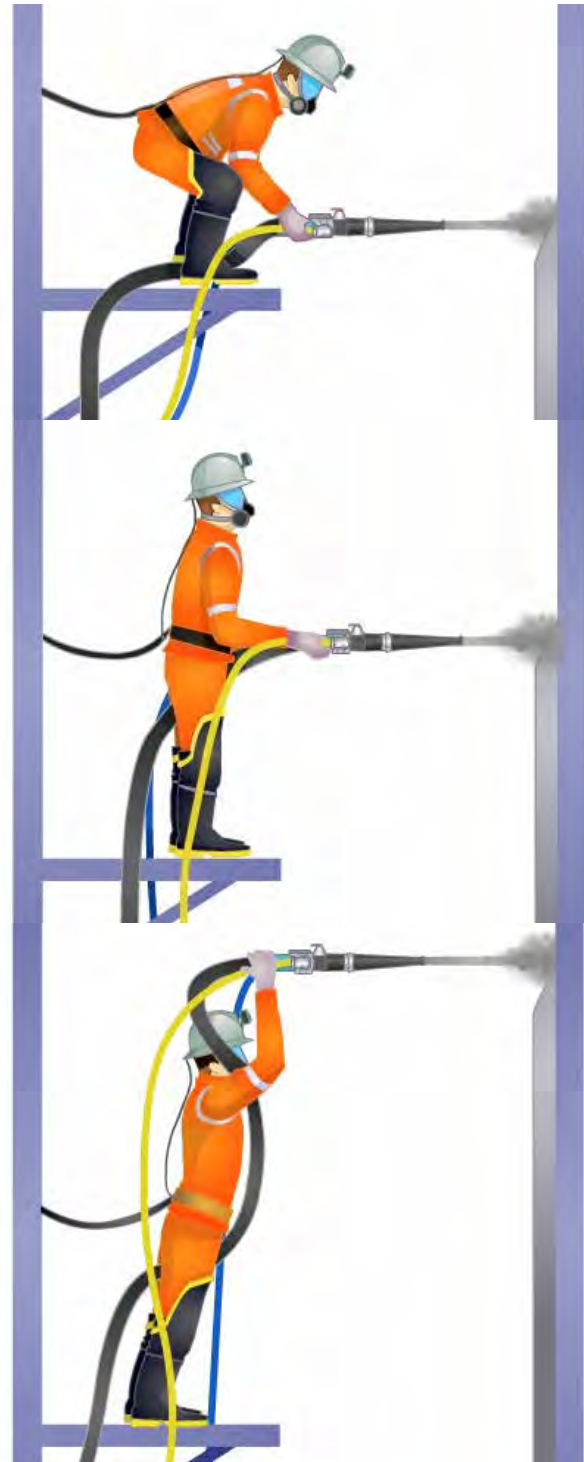


Figura 9.4 Aplicación de shotcrete manual de forma metódica, desde abajo hacia arriba. Considerar la posición de la boquilla con respecto al operador y su manipulación.



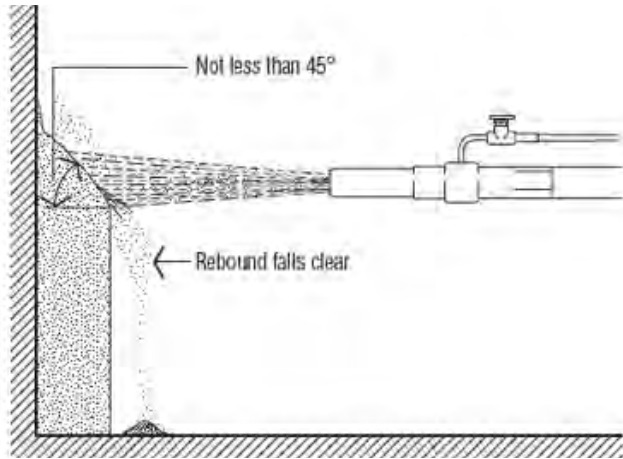


Figura 9.5 La cuña superior debe mantenerse con una inclinación no menor a 45° para evitar que el rebote contamine el shotcrete colocado y la proyección debe ser realizada proyectando contra el sustrato a 90°.

### 9.5.2.6 El encapsulamiento del refuerzo

Cualquier material o accesorio que requiera quedar encapsulado por el hormigón debe ser adecuadamente amarrado y posicionado antes de la proyección. La malla o barras de armadura deben ser diseñadas y detalladas para facilitar el encapsulamiento y minimizar el rebote (Figura 9.6).

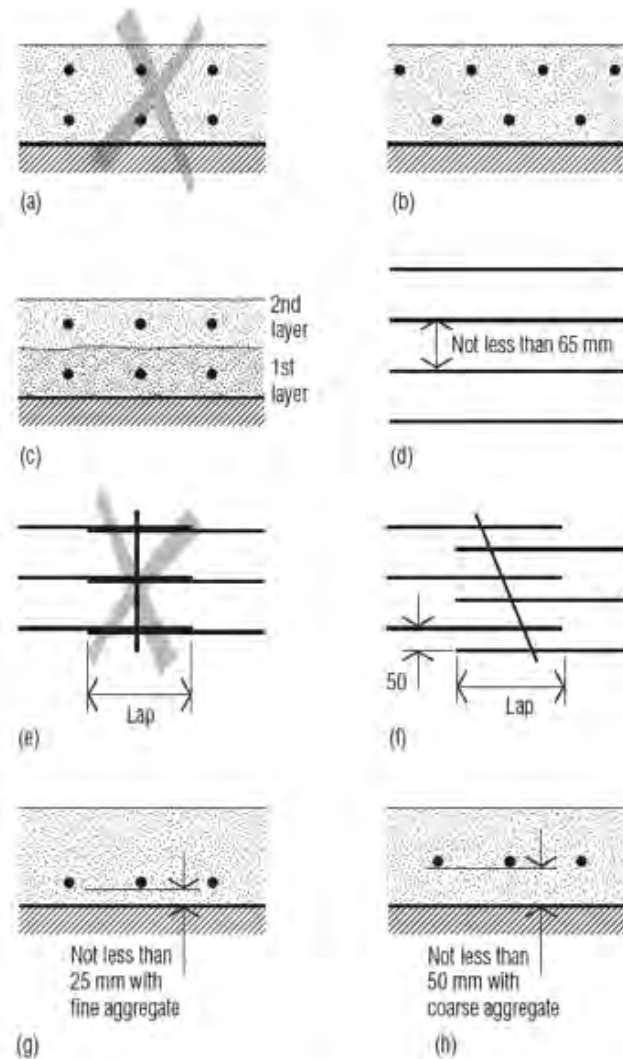


Figura 9.6 Distribución recomendada para las barras.

Cuando se proyecta a través de las barras de refuerzo, la boquilla debe mantenerse más cerca y moverse en diferentes ángulos para permitir un mejor encapsulado y para facilitar la eliminación de rebote. Este procedimiento hace que el hormigón proyectado se deposite detrás de la barra y reduce la acumulación en la cara frontal (Figura 9.7). Cuando las barras están muy juntas y no es fácil proyectar una capa a la vez se puede recubrir más de una capa de refuerzo de manera simultánea, siempre que la boquilla cambie su posición para asegurar el encapsulado. Si se aplican más de 50 mm de recubrimiento de hormigón no reforzado la probabilidad de caída o escurrimiento se incrementa, especialmente durante el acabado de la superficie. Para estos casos es recomendable disminuir la dosis de acelerante y reducir el asentamiento, permitiendo que el material pueda envolver mejor las barras.

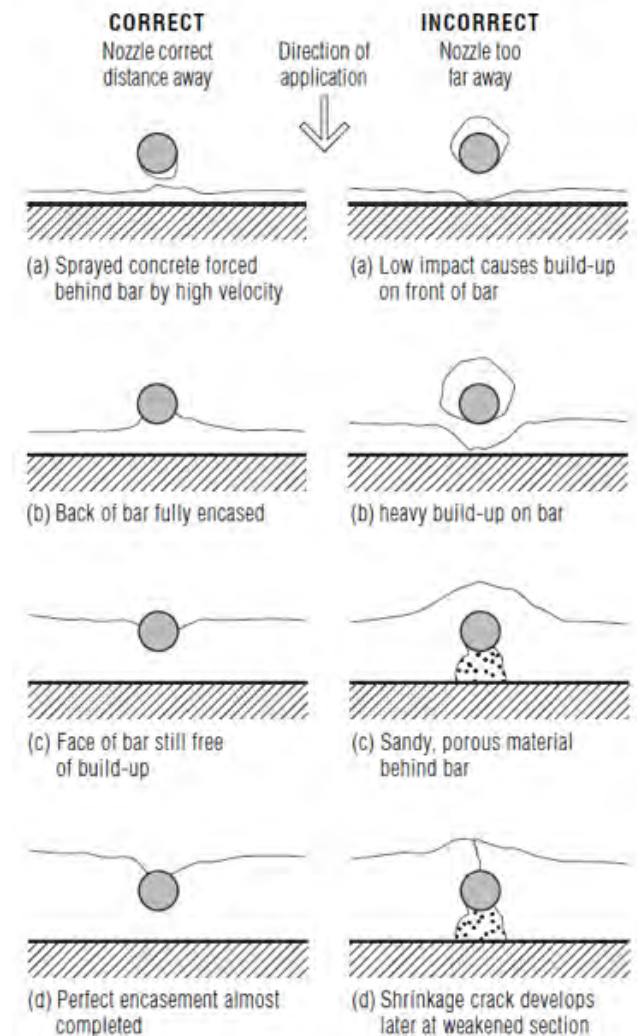


Figura 9.7 consecuencias de una pobre proyección y débil encapsulamiento de las barras.

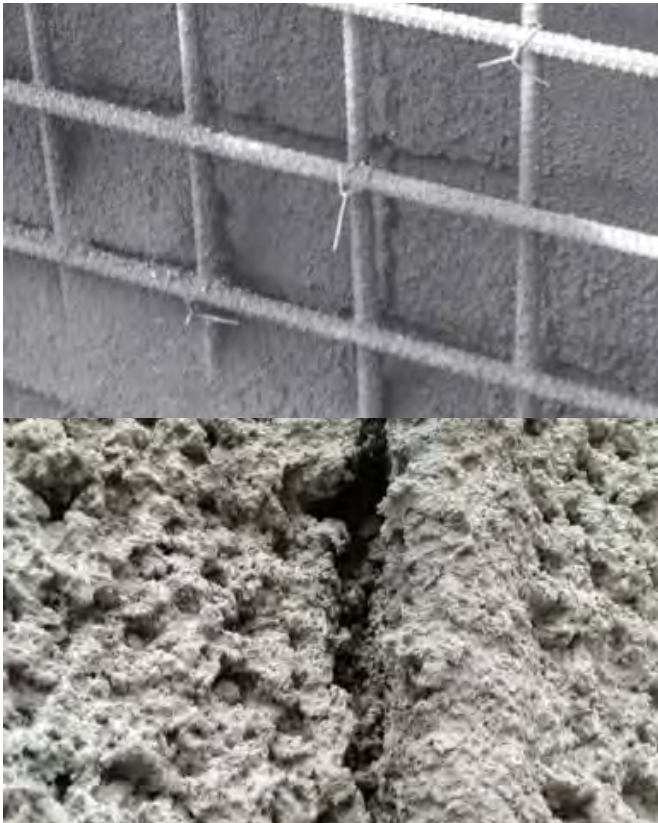


Figura 9.8. Ejemplos de una proyección donde ha quedado mal encapsulada la enfierradura.



Figura 9.9 Testigos extraídos que muestran el mal encapsulamiento de las barras.

### 9.5.2.7 Control del nivel y alineamiento de la proyección

Se requiere de una forma efectiva y comprobada para controlar el nivel y alineamiento de la proyección para lograr el espesor y perfil del hormigón proyectado terminado. Dicho control se puede lograr mediante el uso de alambres de guía, tiras de guía, calibres de profundidad, sondas de profundidad, moldes convencionales o guías láser.

### 9.5.2.8 Rebote

El rebote es aquel hormigón proyectado que no se adhiere a la superficie que está siendo proyectada y que salta de la superficie de hormigón proyectado ya colocado. Este material no se debe volver a utilizar en el equipo de hormigón proyectado

ni ser usado en otros lugares de la obra. Cuando el flujo se dirige contra una superficie rígida la cantidad de rebote puede ser más alta de lo normal. Una vez que una capa amortiguadora se ha formado sobre la superficie, la cantidad de rebote generalmente se reduce. Por lo tanto, las secciones más gruesas de hormigón tienen un menor rebote general que las secciones delgadas.

El porcentaje de rebote depende de variados factores incluyendo:

- La experiencia del pitonero y su habilidad para el manejo de la boquilla (Figura 9.10). La distancia entre la boquilla y el sustrato tiene una gran influencia en el rebote así como el ángulo de aplicación. El ángulo de aplicación debe estar tan cerca como sea posible a la perpendicular.
- La eficiencia del equipo de proyección de hormigón, incluyendo la presión del aire suministrado.
- El diseño de la mezcla, incluyendo tamaño de los agregados y su graduación. (El rebote aumenta significativamente cuando el tamaño máximo del árido es superior a 14 mm).
- Trabajabilidad del hormigón.
- La selección de los materiales finos complementarios incorporados en el diseño de la mezcla, tales como la microsíllice o materiales similares que ayudan mejorar la adherencia.
- Tipo y rugosidad de la superficie.
- Profundidad de hormigón ya proyectado en el sustrato.

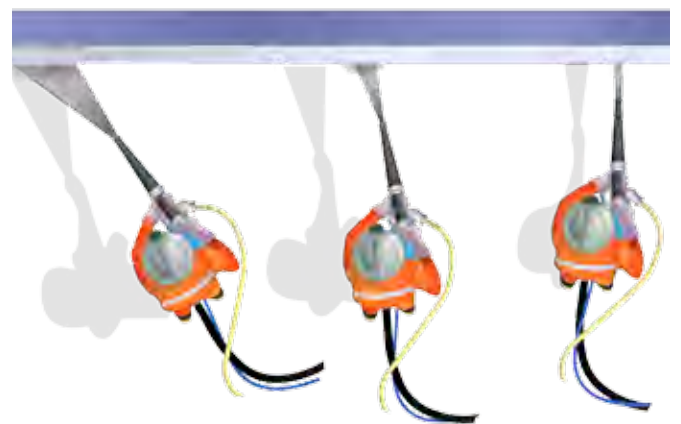


Figura 9.10 Posición del operador y su efecto sobre el rebote y/o rechazo en la proyección.



### 9.5.3 Juntas

#### 9.5.3.1 Juntas de construcción o expansión

Las juntas de fin de día y las juntas de construcción son muy importantes en un uso satisfactorio del shotcrete para construcción o como elemento de protección. Una junta por término de faena no moldeada debe terminar en un borde inclinado de un ancho de 200mm a 300mm para espesores de 75mm o menos, con un ancho proporcionalmente mayor para mayores espesores (Figura 9.11a). La superficie en la parte inclinada se debe escobillar para remover la lechada y el rebote y debe dejarse fraguar, pero no se debe cortar o alisar. Antes de recomenzar la proyección la cuña debe ser lavada con agua y aire a presión y debe dejarse húmeda. La cuña completa debe cubrirse con hormigón lo antes posible y desde allí se debe recomenzar la proyección. Donde se espere que la junta transmita esfuerzos de compresión, esta debe ser moldeada como una junta de tope, por ejemplo esto ocurre en una junta longitudinal de un arco o muro.

Las juntas hechas con regla o tope se tratan de manera similar (Figura 9.11b y 9.11c), permitiendo trabajar mejor la junta. Las juntas del tipo (a), (b) y (c) se pueden mejorar aún más mediante la aplicación de una lechada antes de la proyección. En aplicaciones marinas se utiliza una junta recortada (Figura 9.11d) donde la superficie superior se ha eliminado para evitar posibles fallas en la junta debido a la contaminación con sal de la superficie de contacto.

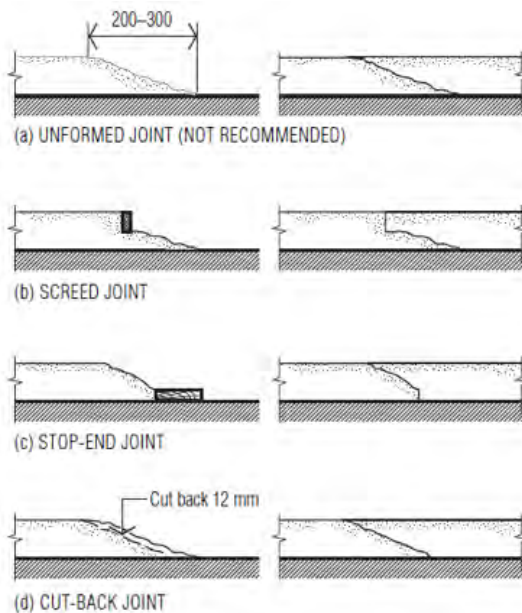


Figura 9.11 Práctica recomendada para la realización de juntas, aplicable a superficies verticales y muros.

Para juntas impermeables no se recomienda el uso de tapones (water stops) internos ya que atrapan el rebote. La Figura 9.12 muestra soluciones para juntas impermeables. Donde no se requieren juntas específicas por diseño es posible cortar el hormigón donde se desee inducir la fisura de manera que esta sea controlada.

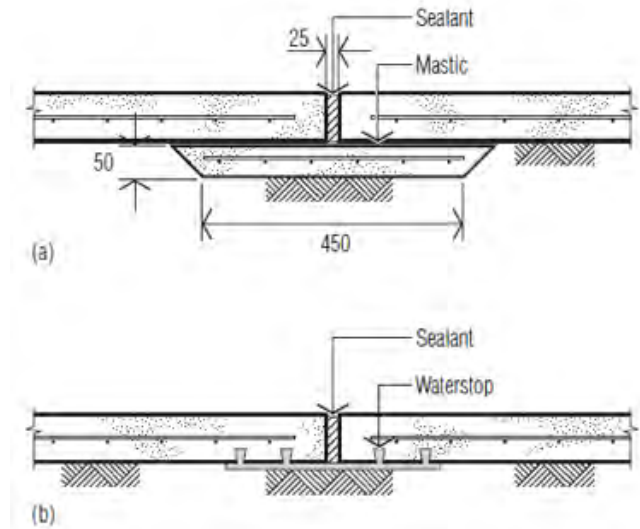


Figura 9.12 Dos métodos para producir una junta estanca al paso de agua.

### 9.5.4 Terminaciones

#### 9.5.4.1 Terminaciones naturales

El acabado natural dado por la boquilla deja una textura superficial irregular, que es adecuado para muchas aplicaciones (Figura 9.13).



Figura 9.13 El acabado "de boquilla" puede ser adecuado para muchas aplicaciones.

#### 9.5.4.2 Terminaciones decorativas

En aplicaciones donde se requiere una terminación con un mejor alineamiento, apariencia o suavidad, el hormigón proyectado se coloca con un espesor ligeramente superior al indicado en las guías (maestras o moldes) y se deja fraguar un momento para luego enrasar y recortar exceso de material para dejar a nivel de la guía maestra, es lo que se denomina acabado con regla, el que puede ser vertical u horizontal, pero la superficie sigue exhibiendo la marca de los áridos arrastrados durante el enrasado. Es posible entonces, si es necesario, alisar con una llana de acero o un platocho de madera que ofrecen un acabado más liso, además, es posible pasar una esponja para mejorar la terminación sobre la superficie ofreciendo un acabado final de alta calidad.

En general, en faenas de proyección de shotcrete manual, un asistente va detrás del pitonero con una regla para cortar y después alisar con una llana. Es una mala práctica aplicar una llana demasiado fuerte ya que esto altera el hormigón proyectado y destruye su compactación original.

Es posible lograr formas arquitectónicas y decorativas y únicas de alta calidad con un operador experimentado, tales como piedras, bloques de arenisca y paredes de roca (Figura 9.14 y 9.15).



Figura 9.15 Terminación de muro imitación de roca.



Figura 9.16 Terminación lisa de un Skate-Park.

### 9.5.5 Curado

Las mismas consideraciones de curado del hormigón normal se aplican al hormigón proyectado. Por sus características el hormigón proyectado necesita un curado más efectivo, debe ser curado correctamente para desarrollar toda su resistencia potencial y durabilidad. Esto es particularmente importante en secciones delgadas, superficies texturadas y relaciones agua/cemento más bajas normalmente asociadas con el shotcrete.

Todas las superficies de hormigón proyectado deben ser curadas por uno o más de los métodos siguientes:

- Curado húmedo.
- Compuestos de curado de membrana líquida (no recomendable en túneles o proyectos que se construirán en capas sucesivas).
- Agentes de curado interno.
- Curado natural.

El curado húmedo se puede realizar utilizando arpillera, lona, láminas de plástico u otros materiales adecuados manteniéndolos continuamente húmedos. El curado húmedo debe aplicarse a las superficies inmediatamente después de la finalización de la aplicación y las operaciones de acabado. Cuando se utiliza el curado húmedo se debe especificar un mínimo de tres a siete días continuos.

Las membranas de curado líquidas pueden ser usadas en shotcrete. Sin embargo, si la membrana deteriora la adherencia entre hormigón antiguo y hormigón nuevo no se debe usar cuando se requiere colocar capas adicionales de shotcrete. Si es necesario, el agente de curado debe ser retirado por chorro de agua, chorro de arena o un proceso similar, antes de la aplicación de la siguiente capa. Para mayor información ver la especificación para hormigón proyectado de EFNARC.

Los agentes de curado interno están disponibles y se han utilizado con éxito en muchos proyectos. Es posible realizar pruebas preliminares respecto a su efectividad, las que pueden quedar definidas en la especificación y/o en el suministro de hormigón o como parte de la oferta del contratista.

Podemos considerar el curado natural si las condiciones atmosféricas que rodean al hormigón proyectado son adecuadas, por ejemplo cuando la humedad relativa es igual o superior a 85%. Se debe tener el cuidado de asegurar que el hormigón no se seque debido a una humedad relativa reducida, una mayor temperatura del aire o el aumento de la velocidad del viento/aire en particular en túneles.

Debe evitarse el secado rápido del hormigón proyectado al finalizar el período de curado. Para todos los regímenes de curado, la superficie de hormigón proyectado se debe mantener a una temperatura no inferior a 5°C durante todo el período de curado.

## 9.6 Secuencias en la proyección de hormigón

### 9.6.1 Muro de contención

La secuencia de fotos de las Figuras 9.16 muestra el método por el cual un muro de contención reforzado puede ser construido en una serie de paneles construidos en secuencia con la proyección de shotcrete entre pilas. El proceso se inicia con la instalación de las pilas seguido por la instalación de los anclajes de terreno y del acero de refuerzo de acuerdo a

las dimensiones y perfil requerido. La proyección comienza en la base de cada panel (a) y avanza hacia la parte superior (b). Una vez que la parte superior se ha completado se establecen los niveles de la superficie de hormigón proyectado (c) y se nivela/enrasa la pared (d). Las paredes son platabachadas (e) antes de aplicar un acabado final con una esponja (f).



Figura 9.17 Proceso de proyección en muro de contención con shotcrete manual.



### 9.6.2. Piscina

Para construir una piscina usando hormigón proyectado, se colocan los moldajes y se instala el refuerzo y la grifería completa, desagües, etc. Ver Figura 9.18 La proyección se inicia desde la parte inferior de cada pared y procede hacia arriba hasta terminarla (b), a medida que se va terminando de

proyectar las paredes comienza el corte y enrasado, en primer lugar la parte superior y luego hacia la base (c) y (d). A continuación se proyecta sobre el suelo (e) y finalmente los peldaños y otros elementos decorativos son terminados a mano (f).



Figura 9.18 Construcción de una piscina con hormigón proyectado.

### 9.6.3 Canales y tranques de agua

El shotcrete es un método efectivo para colocar el hormigón en superficies en contacto con el suelo para producir estructuras tales como los tanques de retención de líquidos. La secuencia de fotos en la Figura 9.19 muestra la construcción de un tanque de retención de aguas lluvia. Después de la excavación y la colocación del refuerzo y de las instalaciones de servicios que sean necesarias (a), la proyección comienza en la base de cada pared inclinada (b) y procede hacia arriba hasta el

coronamiento (c). La superficie ya proyectada es progresivamente cortada, enrasada y se le da una terminación lisa (si se requiere) hasta que todos los muros hayan sido completados (d). En la base se aplica la misma mezcla de hormigón proyectado utilizada para las paredes (e). El suelo y las paredes son terminados con llanas de acero o herramientas para pisos industriales (f).



Figura 9.19 Construcción de canal con hormigón proyectado.





Figura 9.19a Aplicación de shotcrete manual en talud y muros de contención, sobre equipos de levante.



Figura 9.19b Detalle de aplicación de shotcrete manual sobre equipos de levante en superficie.



Figura 9.19c Detalle de aplicación de shotcrete manual sobre equipos de levante, en obra subterránea.

## 9.7 Hormigón proyectado robotizado (mecanizado)

La proyección con equipos robotizados se utiliza ampliamente en la minería a cielo abierto y subterránea y en las actividades de construcción de túneles civiles y en estabilización de taludes. Este tipo de proyección (con mayor frecuencia en el uso del sistema de mezcla húmeda) permite la aplicación de un mayor volumen de hormigón proyectado y tiene la ventaja de que el operador puede guiar un brazo (telescópico o articulado) que tiene montada una boquilla, esto le permite llegar a zonas que de otra forma serían inaccesibles.

Esta sección se refiere principalmente a la utilización de equipos móviles de mezcla húmeda de hormigón proyectado como se describieron en el capítulo 6. Aun cuando se tendrá en cuenta otros equipos, el énfasis principal se encuentra en las máquinas típicas que se muestran en la Figura 9.20.

Entre las ventajas del uso de plataformas mecanizadas de proyección de shotcrete (ya sea equipos tele comandados directamente por un operador o equipos de accionamiento programado como en las TBM), además de facilitar la aplicación en puntos inaccesibles y mantener al operador relativamente a salvo de áreas peligrosas por desprendimientos, polvo, rebote, etc.; éstos equipos permiten mantener controlados factores muy importantes para la calidad resultante del hormigón proyectado, como el ángulo y distancia uniforme de la boquilla de proyección respecto del sustrato y eventualmente el espesor de capa proyectada.

Considerando que (en el caso de los equipos tele comandados) el factor humano (aptitud del operador) y el diseño del brazo robotizado inciden directamente en los puntos mencionados; la orientación de la técnica de diseño y construcción de los equipos modernos tiende a la construcción de brazos hidráulicos que contemplen en su diseño el principio del paralelogramo que permita, con la menor cantidad de movimientos o comandos dependientes del operador, mantener el ángulo y distancia de proyección.

Es por eso que cada vez más los diseñadores y constructores se enfocan en la incorporación de sistemas de medición del sustrato en tiempo real y se están considerando nuevos diseños de brazos mecanizados distintos a los sistemas simples de brazo tipo pluma telescópica que tienden a la obsolescencia.

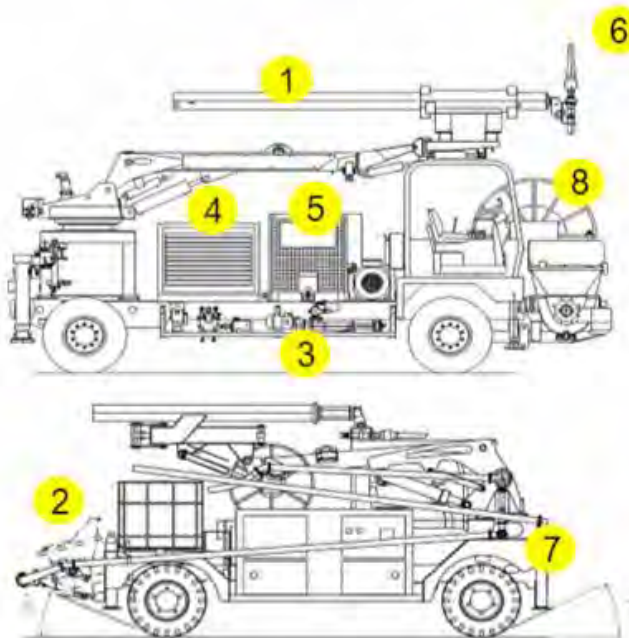
Otros puntos importantes en el desarrollo de los equipos modernos de shotcrete mecanizado son la tendencia al bombeo del hormigón totalmente libre de pulsaciones, mediante sistemas de control programado de los fines de carrera en cada embolada y la programación del dispositivo de dosificación de acelerante proporcional al caudal de hormigón bombeado.

Resumiendo, las ventajas principales de la proyección robotizada incluyen una mayor velocidad de producción, cubrir secciones de mayor magnitud en extensión y altura, eventualmente en túneles podría reducir los tiempos de ciclo, una mayor seguridad para el operador, el ahorro de costos debido a la

reducción de uso de equipos auxiliares y mano de obra comparado con shotcrete manual, un mejor control de productos y producción, disminución en la carga efectiva de trabajo asociado a las faenas de shotcrete, disminución del rebote y una mejor condición de trabajo para la cuadrilla que acompaña al operador.



Figura 9.20 Variedad de equipos robotizados para shotcrete.



- Brazo de Lanzado 1
- Bomba para Hormigón 2
- Sistema Dosificación 3
- Compresor Aire 4
- Tanque para acelerante 5
- Línea de Transporte Hormigón (manguera y boquilla) 6
- Luces de trabajo
- Sistema Auxiliar para lavado y mantenimiento
- Chasis 4 WD 7
- Accionamiento EH + Cable HV 8

Figura 9.21 Componentes de un equipo de shotcrete para vía húmeda.



## 9.7.1 Puesta en marcha

### 9.7.1.1 Inspección de riesgos antes de la proyección.

Antes de acercarse a cualquier área en la que se va a aplicar hormigón proyectado, el equipo debe estacionarse en una posición segura y se debe realizar a pie una inspección del área de trabajo. Dado que el hormigón proyectado se aplica a menudo en zonas donde no hay suficiente apoyo en tierra firme se debe evaluar el riesgo de caída de rocas y se debe seleccionar una posición segura para instalar la plataforma. En un ambiente subterráneo, se debe evaluar si la ventilación es adecuada para eliminar desde el punto de trabajo el polvo y los humos que se generarán durante la proyección. Se debe restringir a través del uso de la señalización y barricadas el acceso a la zona de trabajo de personal y equipos no relacionados con el proceso de hormigón.



Figura 9.22 Señalética de prevención.

La superficie a proyectar el hormigón debe ser examinada por si existieran explosivos sin detonar (en caso de haberse realizado previamente una tronadura), suelo y roca suelta, filtraciones de agua y cualquier signo de desplazamiento del terreno, además de esperar la autorización después de la evacuación de gases producto de la tronadura. El operador también debe aprovechar esta oportunidad para identificar las áreas en las que será difícil aplicar shotcrete (zonas de sombra). En un ambiente subterráneo, la iluminación adecuada es crítica para asegurar que estos riesgos puedan ser identificados por el operador, y se recomienda usar para las inspecciones una linterna de mano de alta potencia. Después de una minuciosa inspección y evaluación de riesgos se puede llevar al lugar indicado el equipo de hormigón proyectado.

### 9.7.1.2 Puesta en marcha de equipos

Los equipos de proyección de shotcrete se abastecen normalmente con hormigón mediante el uso de un camión mixer o agitador. Estos camiones se pueden utilizar tanto para mezclar y transportar el hormigón o simplemente para transportarlo (ver Figura 9.23a y 9.23b). Normalmente, se descarga la mezcla de hormigón en una tolva situada en la parte trasera del equipo. El camión mezclador de hormigón retrocede hasta la tolva guiado por un asistente que siempre debe estar observando la descarga de la mezcla. Este ayudante debe estar visible

para el operador del camión en todo momento. Todo el personal involucrado en este proceso debe estar consciente del riesgo de aplastamiento entre la tolva y la parte trasera del camión agitador, es decir, la comunicación es de vital importancia, especialmente en un entorno subterráneo que puede ser oscuro y ruidoso.

Cuando se trabaja en pendiente las ruedas del camión mixer deben quedar calzadas de modo que no se produzca un movimiento incontrolado de la maquinaria. La máquina de hormigón proyectado se estabiliza mediante el uso de "patas" tipo gato hidráulico. El camión mixer convencional de uso en ciudad no es totalmente recomendable para el uso en la minería, ya que no tienen frenos de suficiente capacidad.



Figura 9.23a Nuevos desarrollos en camión agitador y mixer, con control de descarga remota modelo Mixtec UV2-HD (imagen gentileza AtlasCopco).



Figura 9.23b Otros modelos de equipos mezcladores usados en obras subterráneas, civiles y de minería.

### 9.7.1.3 Tratamiento de retrasos (demoras)

En un entorno de minería u obra subterránea en general, es usual que se produzcan retrasos en la proyección de hormigón. En faenas mineras de mucha complejidad donde hay actividades de expansión y producción en ciclos, es un caso de estudio la optimización y disminución de tiempos de espera, especialmente cuando entran en conflicto las prioridades de las actividades de expansión y de producción.

En el caso de retrasos, se debe tener cuidado para evitar la hidratación del hormigón. Se debe aplicar a la carga un estabilizador en las dosis recomendadas y evitar mezclar de manera continua. Cualquier incorporación de aditivo o agua debería anotarse en los registros de suministro de hormigón. La adición de agua se debe evitar debido a los efectos perjudiciales sobre la resistencia. Cuando la carga es capaz de ser proyectada de nuevo, el "huevo" del camión se debe girar por un período de tiempo suficiente antes de la descarga para garantizar que la carga se ha vuelto a mezclar adecuadamente.

La mantención de la trabajabilidad de un mezcla de shotcrete depende fuertemente de cantidad de agua libre. Los ensayos muestran que ésta puede cambiar drásticamente con pequeñas variaciones en la dosis de agua inicial.

Sin embargo, mayores cantidades de agua demandan mayores cantidades de cemento (para igual razón a/c) y retardan el fraguado de la mezcla (aumento en la dosis de acelerante). Se puede ver en la Figura 9.23 un gráfico de pérdida de trabajabilidad.

Soluciones recomendadas:

- Conocer con anticipación la trabajabilidad requerida y duración del ciclo de hormigonado.
- Proteger la mezcla de la alta temperatura, viento, radiación y evaporación.
- Evaluar el uso de controladores de fraguado.



Figura 9.24 Gráfico de pérdida de trabajabilidad, efecto temperatura.

## 9.7.2 Preparación del sustrato

La preparación del sustrato es crítica para el desempeño del hormigón proyectado. En aplicaciones de minería y en la mayoría de las obras civiles el sustrato es comúnmente roca o suelo. El hormigón proyectado también se usa frecuentemente en minería en el desarrollo de túneles a través de bancos de relleno. El relleno se puede considerar como un suelo consolidado desde el punto de vista material. Para asegurar una adherencia adecuada del hormigón proyectado al sustrato, todo material como polvo y la roca suelta se debe quitar antes de la aplicación de shotcrete.

La remoción de roca suelta se logra a través de un proceso conocido como "scaling". La superficie o sustrato debe estar húmeda (pero sin agua libre) para evitar que el área de proyección absorba el agua del hormigón. La superficie debe limpiarse inmediatamente antes de la proyección para evitar que el polvo en la superficie impida la adherencia del hormigón al sustrato.

### 9.7.2.1 Scaling

Hay varios tipos de "scaling" utilizados en minería y aplicaciones civiles, aunque los más comunes son el método mecánico, ya sea usando un equipo especial para este propósito o un taladro, y el método "hydroscaling" o chorro de agua a alta presión. Ver Figuras 9.25a, 9.25b y 9.25c.





Figura 9.25a. Scaling mecánico.



Figura 9.25b. Scaling con agua, o hydroscaling, la figura presenta un accesorio adicional al brazo que aumenta la presión de la salida de agua para una mejor limpieza.



Figura 9.25c. Scaling combinado.

El "hydroscaling" mejora la resistencia de la unión, además de la eliminación de suelo suelto. El Scaling puede ser inapropiado en algunas situaciones en las que existen rocas muy débiles. En estos casos, el sustrato se prepara habitualmente lavando ligeramente la superficie con agua.

Cuando el hormigón proyectado se va a aplicar directo al suelo, no se requiere necesariamente un "scaling", debido a que las pequeñas fisuras y grietas en la tierra se llenarán de hormigón proyectado, estabilizando así el terreno suelto.

El método "hydroscaling" utiliza un chorro de agua a alta presión para eliminar las piedras sueltas y el polvo de la superficie. Normalmente se mantiene la presión de agua entre aproximadamente 3000 psi y 6000 psi. Generalmente es usado el mismo equipo de shotcrete para realizar esta limpieza.

Cuando se aplique esta técnica cerca de un hormigón ya proyectado, es recomendable aplicar el "hydroscaling" a una distancia de aproximadamente 1.5m desde el hormigón ya proyectado para asegurar una buena adherencia en la superposición del shotcrete. El operador debe entonces tratar progresivamente la roca que va a proyectarse, desde lo más cercano a lo más lejano y de arriba a abajo de manera que el brazo nunca se exponga a terreno no preparado.

Si se ven grandes bloques inestables, puede representar un peligro para el brazo del robot durante la proyección. Ante dicha circunstancia es necesario solicitar un "scaling" mecánico. Terminado este proceso mecánico, siempre se recomienda la aplicación de un chorro de agua para eliminar el polvo y rocas menores sueltas.

### 9.7.2.3 Otras consideraciones

En áreas que deben ser "mapeadas" geotécnicamente o fotografiadas esto debe hacerse antes de la proyección de shotcrete.

Hay que tener en cuenta que la entrada de agua en exceso es un problema para la proyección de shotcrete y deben tomarse medidas para reducir o desviar el flujo. Alternativamente, se pueden instalar previamente drenajes para permitir que el agua fluya fuera del hormigón proyectado en lugar de levantar presión sobre de él.

## 9.7.3 Procedimiento de la proyección

### 9.7.3.1 Actividades previas

Antes de cualquier proyección de hormigón, el equipo debe ser cuidadosamente recubierto con una capa de desmoldante (o similar) para ayudar con la limpieza de la máquina después de la faena de shotcrete.

La boquilla de hormigón proyectado debe ser revisada constantemente después de cada faena, para verificar su limpieza y desgaste. Tanto la boquilla como el cuerpo difusor del acelerante y aire, son factores que pueden afectar la velocidad del hormigón proyectado a través de la boquilla y por lo tanto la compactación que se logra. La mayoría de las boquillas tienen algún tipo de marcador de desgaste inherente a su diseño que indicará cuando deben ser cambiadas.

Las líneas del acelerante también deben ser revisadas antes de que comience la proyección. Se realiza cerrando la válvula de aire de la boquilla, apuntando hacia el suelo (para detener el acelerante que pueda devolverse por la línea de hormigón) y de a poco encender el suministro de aire para verificar que no haya fugas y la presión este correcta antes de activar el paso del acelerante. El flujo del acelerador se puede comprobar observando el medidor en la bomba de aditivos, o se evalúa tomando el tiempo de llenado de un recipiente calibrado. Así mismo, debe asegurarse que la dosis coincide con las recomendaciones del fabricante para el contenido de cemento de la mezcla a proyectar.

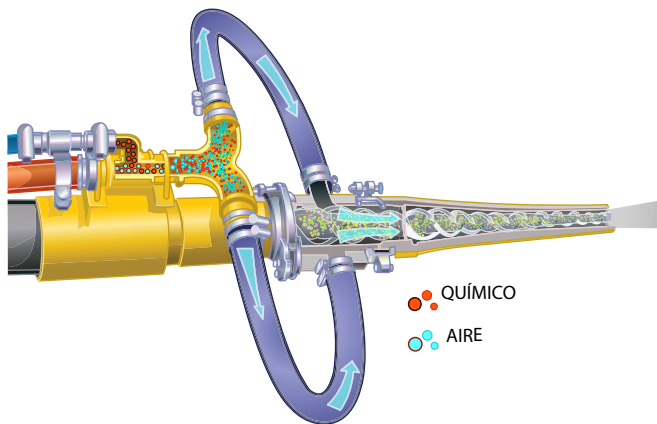


Figura 9.26 Esquema del proceso y flujo del aire, aditivo acelerante y hormigón al interior del cabezal y tobera del equipo de shotcrete.

La bomba de hormigón y toda la línea se debe lubricar con algún tipo de lechada o similar. Este material debe ser descargado sobre algún recipiente y nunca sobre la superficie que será proyectada. (dependiendo de la normativa medioambiental a que este sujeto el proyecto o área de trabajo pueden existir disposiciones especiales para la manipulación de estos líquidos, por tanto tampoco debiera ser vaciado al suelo); El cebado o lubricación puede ser innecesario si las líneas están todavía húmedas tras la limpieza de una carga reciente. El operador debe evaluar el estado de la mezcla de hormigón proyectado previo a la descarga. El asentamiento del hormigón proyectado generalmente puede ser evaluado visualmente por un operador con experiencia o, alternativamente, se puede realizar un ensayo de asentamiento. El operador debe también aprovechar esta oportunidad para comprobar que la mezcla no evidencia la formación de bolas de fibra u otros bultos grandes que pueden causar bloqueos. La rejilla protectora sobre la tolva de hormigón debe estar siempre en su posición y activado el vibrador para ayudar a descender la mezcla. El uso de la parrilla es relevante para detener cualquier material de un tamaño excesivo que pueda entrar en la tolva.

Antes de que comience la proyección, el operador debe estar en una posición donde disponga de buena visibilidad al punto de proyección. Cuando se opera en un extremo del túnel, el operador tendrá que estar a un costado del equipo para proyectar la primera mitad y luego requerirá caminar alrededor de la máquina y del camión a una segunda posición en la que el área que se va a proyectar en el otro lado del túnel sea visible desde su nueva posición.

### 9.7.3.2 Técnica de proyección

Para minimizar el rebote y maximizar la compactación, la boquilla se debe mantener siempre a una distancia de 1 a 2 metros de la superficie que se está proyectando. También es importante el correcto ángulo de la boquilla el que debería ser, en lo posible, perpendicular a la superficie.

El operador debe proyectar primero en todas las fisuras y fallas para asegurarse de que están llenas de hormigón proyectado. Todos los ángulos "escondidos" (sombras) y posibles zonas de acumulación de rebote se deben proyectar en segundo lugar (ver Figura 9.27). Después de ello, se puede proyectar sobre el sustrato la primera capa de shotcrete. El operador debe comenzar en el punto más bajo y trabajar hacia delante en un patrón oscilatorio horizontal para rociar una capa uniforme de hormigón proyectado sobre la superficie.

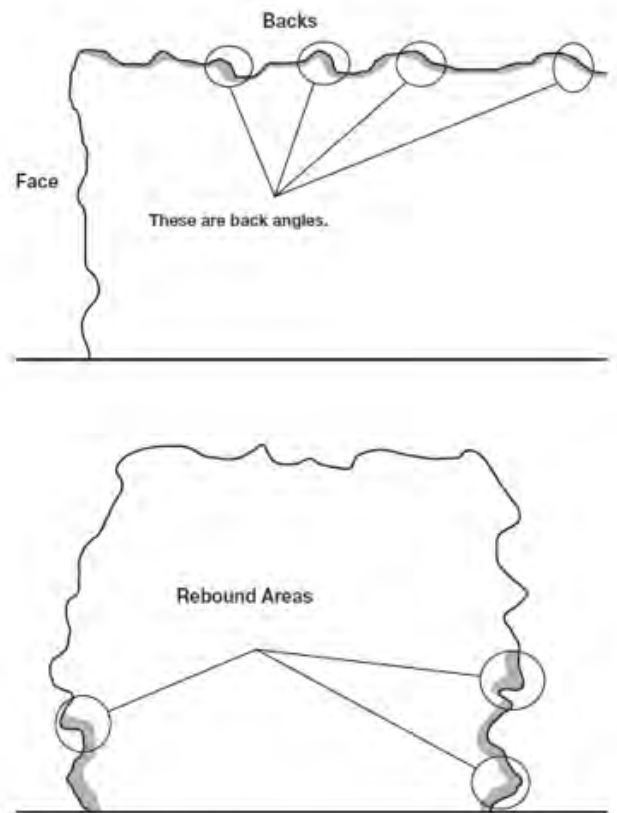


Figura 9.27 Áreas comunes en un túnel que producen problemas de rebote y sombra.

Otros alcances sobre la técnica que permiten la disminución del rebote fueron analizados en el punto de shotcrete por vía manual.

El hormigón proyectado se aplica generalmente en capas de aproximadamente 25 mm para evitar el desprendimiento de material, especialmente en aplicaciones sobre cabeza. El operador debe esperar al menos unos diez minutos entre capas para asegurar que el hormigón frague y permita una adherencia que pueda sostener la segunda capa. La mayoría de las aplicaciones de minería requieren un espesor de hormigón proyectado de entre 50 mm y 100 mm y las aplicaciones civiles requieren normalmente un espesor superior a 100 mm.



Es importante controlar el espesor para asegurar que se está logrando no sólo el espesor adecuado sino también que la aplicación es de espesor uniforme y que el hormigón proyectado no se desperdicia debido a un espesor excesivo. Los métodos de control de espesor durante la proyección incluyen el uso de sondas de metal, de una longitud establecida, montadas en el extremo de la pluma para comprobar la profundidad del hormigón proyectado húmedo y también se puede usar "puntas" como indicadores de profundidad antes de que comience el rociado. Ambos métodos tienen algunas desventajas:

Las "puntas (usadas para ser instaladas en el revestimiento del túnel)" montadas sobre el brazo pueden causar daños en el sistema hidráulico, dicho sistema es delicado y sensible a los golpes o contrafuerzas además no detectan sobre espesores ni dejan un registro permanente del espesor. El uso de indicadores de profundidad aplicados de manera previa toman un tiempo de instalación y podrían desprenderse por la fuerza de la proyección o quedar "oscurecidos" por el shotcrete (ver fotografía en Figura 9.28a). Ambos métodos sólo proporcionan datos puntuales, y cuando se aplica a superficies rugosas de hormigón proyectado esto puede estar muy lejos de ser representativo del espesor real.

El espesor de hormigón proyectado también puede medirse después de la proyección por otros métodos. El método más común en uso es la perforación y medición de agujeros con una sonda o varilla de acero liso, aunque el pequeño número de perforaciones realizadas combinado con el hecho que sólo proporciona datos puntuales de un área en particular sugieren que este método es de un valor cuestionable, (ver fotografía en Figura 9.28b).

También hay una amplia evidencia de que los agujeros perforados para las mediciones se transforman en puntos de inicio para la fisuración del hormigón proyectado. Se pueden obtener datos más representativos mediante el escaneo tridimensional con equipos láser del área que está siendo proyectada, y más recientemente, a través de la fotometría. Se realiza un escaneo justo después del hidro lavado y otro después de la proyección y ambas mediciones se comparan con lo que se obtiene un "mapa del espesor" (ver Figura 9.28c).

Si se requiere el acceso a la zona para continuar con el avance del túnel, es normal que la proyección de shotcrete sea comprobada a través de un panel de ensayo (panel de reingreso) para habilitar el reingreso. Este panel se debe marcar con la fecha y la hora de proyección, y con un penetrómetro se puede comprobar el desarrollo de resistencia del hormigón proyectado sin tener que entrar en la zona con hormigón fresco. En todas las zonas recién proyectadas se debe indicar que existe riesgo por "hormigón proyectado húmedo".



Figura 9.28a Control de espesor. Puntas adheridas al sustrato.



Figura 9.28b Control de espesor por perforación.

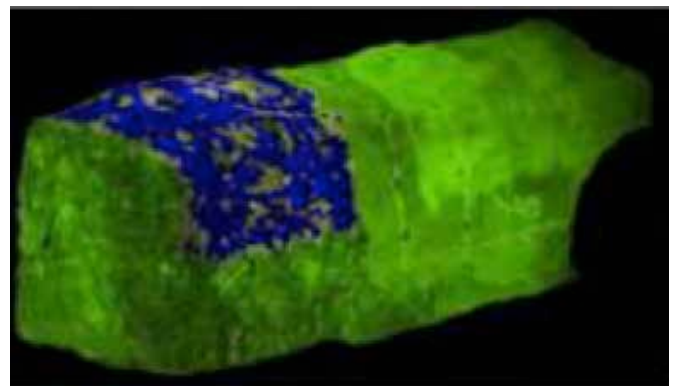


Figura 9.28c Control de espesor con escáner.

### 9.7.4 Limpieza del equipo

La limpieza debe realizarse inmediatamente después de la proyección y debe ser realizada de manera completa para evitar cualquier acumulación de hormigón dentro de la tolva y líneas y en el cuerpo difusor del acelerante y hormigón. Debemos asegurarnos que la bomba está apagada y estable previo a la limpieza.

Se debe desmontar la boquilla para un correcto aseo de la línea. La boquilla puede ser bombeada con agua y soplada con aire para su correcta limpieza.

La tapa de la tolva debe estar abajo y la compuerta debe estar abierta para que se pueda desechar cualquier resto de hormigón proyectado fuera de la tolva. Todas las líneas de flujo de hormigón deben ser sopladas, primero con aire y luego con agua para limpiar las líneas hasta que el agua que salga sea clara.

Los cilindros de la bomba se deben inspeccionar para asegurarnos de que están libres de hormigón y verificar desgastes y otros posibles problemas.

Todo el equipo finalmente debe limpiarse a alta presión y volver a pulverizar aceite desmoldante en las partes móviles.



Figura 9.29 Limpieza del equipo de shotcrete.

### 9.7.5 Curado

El shotcrete aplicado en faenas subterráneas en entornos mineros en general no se cura. Es difícil curar el hormigón proyectado en el entorno de la minería subterránea debido a lo "caliente" que puede estar la roca, las fuertes corrientes de aire que generan evaporación en el hormigón y a la falta de acceso a los túneles que están siendo desarrollados en forma activa. Estas condiciones agravan los problemas de fisuración por retracción del shotcrete.

El curado con agua pulverizada a veces se utiliza en aplicaciones civiles, aunque para la minería, donde el hormigón proyectado se aplica a menudo "en ciclos" ello supondría obstaculizar la producción y extender los tiempos de ciclo.

Hay agentes de curado internos disponibles y se estima que pueden mejorar las propiedades mecánicas de hormigón proyectado en un 20% con aumentos de costo de un 2 a un 5% (Windsor<sup>11</sup>). No se utilizan generalmente en la actualidad en minería ni en obras civiles, pero representan un área potencial de mejora.

### 9.7.6 Aplicación de métodos especializados

Se han desarrollado otros métodos mecanizados de aplicación de hormigón proyectado para aplicaciones más especializadas. Como en el revestimiento de pozos, piques y otras perforaciones verticales con hormigón proyectado aplicado de forma remota y el uso de máquinas de hormigón proyectado con tuneladoras. Ambos métodos han aumentado en popularidad debido a los estándares de seguridad cada vez más exigentes que buscan eliminar personal desde las áreas donde existe riesgo por la presencia de suelos sin sostenimiento.

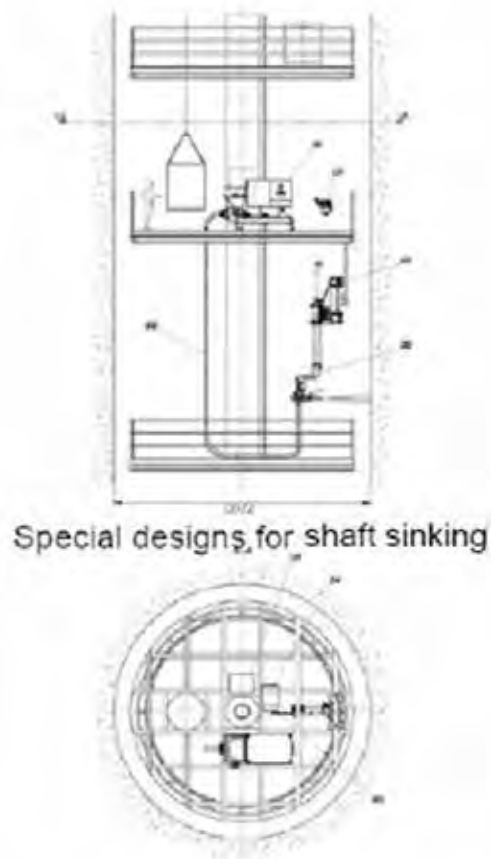
#### 9.7.6.1 Shotcrete remoto en shaft

Se utilizan dos tipos de aplicación con hormigón proyectado en desarrollos verticales. Cuando se utiliza una plataforma de trabajo para que los operadores puedan instalar pernos, instalaciones de servicio u otros elementos de apoyo, entonces se puede colocar bajo la plataforma una boquilla para la proyección de shotcrete, de esta manera el hormigón proyectado se puede aplicar a las paredes del pozo por adelantado, sin riesgo para el operador.

Se han desarrollado también equipos de control completo a distancia (Figuras 9.30) para este uso en los piques donde no existe la posibilidad de acceso de personal. El equipo se opera desde una cabina de control en la superficie y baja por medio de un sistema de cables y con apoyo en los costados con ejes rodados.

Es posible instalar un sistema de cámaras para controlar la proyección. Se ha conseguido llegar hasta 400m de profundidad. Por lo general, se utiliza hormigón proyectado seco en aplicaciones verticales superiores a 50m de profundidad, esto debido al peso del material fresco que se transmite por las líneas de traslado de material.





El montaje es similar a las construcciones de anillo para brazos manipuladores de TBM. La diferencia es el ángulo o la dirección en la que el vehículo portador, en este caso una plataforma, se desplaza ya sea para bajar o subir dentro de un pozo vertical. Dependiendo del diámetro del pozo, se utiliza un brazo montado en un anillo de la plataforma

### 9.7.6.2 Shotcrete en TBM (tunnel boring machines)

La aplicación de hormigón proyectado puede ser incorporada en el montaje de una tuneladora, ya sea montando una boquilla de proyección de hormigón que va a ser operada manualmente o por un equipo de shotcrete robotizado montado directamente sobre la tuneladora (Figura 9.31).



Figura 9.31 Brazo para aplicación de shotcrete montado en una TBM.



Figura 9.30 Equipo de shotcrete para shaft.



# 10

## CAPÍTULO

### Requisitos de Calidad y Desempeño

#### 10.1 Control de calidad – Q&A

Un adecuado programa de aseguramiento y control de la calidad es esencial para obtener un proyecto u obra de hormigón proyectado acorde a los requisitos de diseño establecidos. El objetivo de un plan de gestión de la calidad, que asegure los procesos definidos y controle la calidad del producto, es obtener como resultado el hormigón proyectado que cumpla con los requisitos establecidos para el proyecto. Abarca diferentes facetas desde la producción a la colocación de hormigón proyectado. Por lo general, comienza con el diseño de la mezcla, la aprobación de los materiales constituyentes, pruebas en laboratorio y a escala industrial y la selección de personal calificado (de preferencia certificado) y, por último, la realización de pruebas y ensayos del shotcrete colocado. En todos los proyectos se debe considerar ensayos, tanto previos a la ejecución de la construcción que son parte de la validación del diseño y luego durante la ejecución como verificación del cumplimiento de los requisitos especificados.

En caso de incumplimiento de los criterios de conformidad del control de producción e inspección de hormigón proyectado, las medidas que deben adoptarse incluyen pruebas a los materiales constituyentes, a la mezcla, al hormigón proyectado, al equipamiento para la producción y al traslado intermedio de la mezcla.

El laboratorio que realice las pruebas y ensayos debe evidenciar competencia y experiencia con las pruebas de hormigón proyectado, idealmente debe ser un laboratorio acreditado en la disciplina. Los equipos de medición y ensayo utilizados deben estar bajo un estricto control metrológico y deben ser parte de un programa de calibración, mantención y verificación, definido y controlado, el cual debe llevarse a cabo y debe estar disponible documentalmente durante todo el proyecto.

Los materiales constituyentes tienen que ser comprobados por la administración del proyecto (laboratorio de autocontrol de la obra) además de recibir certificados de ensayos de laboratorios externos.

Conforme a lo señalado en la “Guía de Hormigón Proyectado” Austriaca<sup>38</sup> (tablas 11.1 a 11.5), las pruebas previas a la construcción se llevan a cabo en los siguientes pasos:

- Verificación de la idoneidad de los materiales constituyentes: compatibilidad del agua cuando no sea potable, caracterización de los áridos según el tipo de exposición del proyecto, tipo de

cemento y composición también considerando la exposición y durabilidad, compatibilidad entre el cemento y los aditivos, etc.

- Verificación de la idoneidad del equipo de mezcla y dosificación (planta de hormigón, en especial cuando es en obra), verificación del equipo de proyección, capacidad nominal versus rendimiento efectivo, sistemas de calibración de bombas chequeados y comprobados, equipos suplementarios y disposición de suministros conforme a requerimientos del proyecto.
- Verificación de la mezcla: en laboratorio, en prueba a escala industrial, verificación de la docilidad y su mantenimiento, rendimiento de la mezcla. Todas estas pruebas se realizan sin acelerante.
- Verificación del hormigón proyectado, mediciones de proyección, rebote y mediciones con acelerante, pruebas de resistencia temprana y madurez, resistencia a los días solicitados y a 28 días, medición de impermeabilidad, etc.

Las pruebas las debe realizar un organismo de inspección acreditado u organismo idóneo que dé tranquilidad a las partes; las pruebas de proyección y resistencia inicial se deben realizar en presencia de un profesional con experiencia perteneciente al organismo acreditado y/o al mandante

#### 10.2 Ensayos pre-construcción

Al menos unos 2 meses antes de comenzar la construcción, idealmente 6 meses, se deben realizar ensayos en paneles de prueba con las mezclas propuestas. Para realizar estas pruebas se debe contar con un operador con experiencia y el equipo de hormigón proyectado debe estar en buen estado de funcionamiento y con sus equipos de bombeo calibrados. Los paneles de ensayo deben ser normalizados según el uso y aplicación de que se trate, la definición de este panel es un problema recurrente cuando no se especifica el documento de referencia para el panel y que finalidad cumplirá.

A modo de ejemplo, se debe prestar atención cuando se consideran recomendaciones como “ACI506.2\_95”<sup>50</sup> documento que incluye en sus paneles barras de refuerzo para medir la calidad del operador y verificar la mezcla. Es común ver especificaciones solicitando evaluar el hormigón pidiendo el panel sin armadura o el llenado con fibras.

Los paneles de ensayo durante la proyección deben estar inclinados en un ángulo de aproximadamente 20° contra una superficie vertical. Se recomienda fabricar por lo menos 3 paneles para la extracción de testigos y por lo menos otros 3 paneles para absorción de energía por cada tipo de mezcla o dosis de acelerante a evaluar; esto permitirá la determinación de puntos de referencia de rendimiento durante las pruebas previas a la construcción con una batería suficiente de pruebas preliminares, con una combinación de los tipos de cemento, aditivos y fibras a utilizar.

Las pruebas que por lo general se realizan son las de resistencia a la compresión, absorción de energía, permeabilidad y resistencia temprana. Los paneles de ensayo se deben cubrir con plástico y/o agentes de curado tan pronto como sea posible después de la proyección para evitar la pérdida de humedad. Cuando se ha demostrado que los materiales, diseños de mezcla, equipos, procedimientos y personal han dado resultados satisfactorios en obras similares, estos antecedentes pueden ser utilizados como respaldo para nuevas aplicaciones. Si es necesario, en las muestras solicitadas puede evaluarse la terminación superficial si ello está especificado.

Los siguientes aspectos se deben evaluar como parte de la pre-calificación de una mezcla:

- El resultado promedio de las propiedades en estado endurecido para cada hormigón especificado, sin adicionar acelerante y muestreado en un hormigón no proyectado (muestra nula).
- Resultado promedio, para cada parámetro especificado del hormigón proyectado, con testigos extraídos de paneles de ensayo. Con dosis predeterminadas de aditivo acelerante y con la identificación del operador.
- Promedio de la densidad endurecida y densidad fresca del hormigón recibido en la obra.
- El resultado de las pruebas de resistencia temprana y en estado endurecido a las edades especificadas por norma y por el proyecto.

Los paneles deben ser inspeccionados para asegurar que se alcance el espesor mínimo y al momento de realizar cortes al panel las superficies de corte deben estar libres de defectos tales como "vacíos", "laminaciones" y "regiones mal consolidadas", "lentes de arena", "zonas con rechazo", etc. Se debe evaluar las medidas necesarias para lograr una densidad homogénea del hormigón proyectado sin segregación, sin desprendimiento, sin "planchones", rebote excesivo, u otras imperfecciones visibles durante la proyección.

El informe a presentar debe al menos contener lo siguiente:

- Verificaciones de la idoneidad de los materiales constituyentes.
- Prueba de los materiales constituyentes, así como su combinación (prueba de compatibilidad).

- Composición de la mezcla.
- Pruebas completas de la mezcla en estado fresco.
- Identificación del tiempo abierto de la mezcla y el uso de aditivos que modifican sus propiedades como inhibidores de fraguado u otros.
- Equipo de proyección utilizado y los ajustes realizados durante las pruebas.
- Condiciones ambientales durante la aplicación y las condiciones de almacenamiento de las muestras.
- Fecha, hora, temperatura, operador y lugar de las pruebas de proyección.
- Dosificación del acelerante, indicación de si se utilizó aditivo de más de un proveedor y en que dosis.
- Lugar de prueba (paneles u otras superficies de aplicación).
- Toma de muestras, etiquetado y transporte.
- Evolución del desarrollo de la resistencia temprana.
- Las pruebas de hormigón endurecido.

Los informes de ensayo deben contener la información sobre el procedimiento de ensayo y resultados requeridos en las normas pertinentes.

### 10.2.1. Prueba del diseño y composición de la mezcla

Para el cálculo del diseño de mezcla se recomienda utilizar un máximo contenido de aire de 3.0 % o definir dicho valor de común acuerdo.

El alcance de las pruebas se debe detallar con anticipación. El tiempo de la mezcla (tiempo abierto o trabajable) se debe establecer durante la prueba previa a la construcción. La extensión máxima permitida es la que se alcanza con el máximo contenido de agua y dosis superplastificante admisible.

### 10.2.2. Prueba del hormigón proyectado

Las pruebas de laboratorio son una buena guía sobre el comportamiento, pero no pueden sustituir a la prueba previa a la construcción con el material de obra final. La eficacia de los aditivos para hormigón y su compatibilidad cruzada (en caso de usar varios aditivos) debe ser verificada en la prueba previa a la construcción del hormigón proyectado.

Durante la prueba previa a la construcción de hormigón proyectado se debe medir constantemente la docilidad, el desarrollo de la resistencia temprana y la consistencia de la mezcla.



Cuando se utiliza mezcla húmeda, se deben probar dos dosis del acelerante considerado. Las dos dosis representan los umbrales del rango de aplicación. Por tanto, se debe medir la resistencia inicial con ambas dosis.

Tabla 10.1 Frecuencia recomendada para ensayos en obras civiles y proyectos subterráneos. Basada en una propuesta de la Asociación Australiana de Shotcrete.

Característica a analizar	Frecuencia mínima recomendada
El despacho y entrega de hormigón	
Granulometría del árido grueso/fino - Desviación respecto a árido especificado. Ensayos completos de aceptación (densidad, absorción)	Una por semana
Humedad del árido grueso/fino	Cada día (en invierno dos veces por día)
Asentamiento	Cada "batch"
Construcción de paneles de ensayo	
Proyección de paneles de prueba de producción (con las obras)	Cada 50m <sup>3</sup> o x cada día de proyección
Espesores e inspección visual	
Frecuencia para perforación de agujeros en terreno	Aleatoriamente una perforación cada 50 m <sup>2</sup>
Determinación a 28-días de resistencia a la compresión, densidad y densidad relativa	
Desde la descarga de hormigón - Frecuencia de muestreo y ensayo de probetas	Set de 3 cilindros cada 50m <sup>3</sup> entregados
Desde los paneles de prueba - Frecuencia de muestreo y ensayo de testigos	Set de 3 testigos por cada panel
Determinación de la profundidad de penetración de agua	
De los paneles de prueba - frecuencia en probetas perforadas	Un set de 3 testigos por semana
Determinación de la absorción de energía (tenacidad) – ASTM C1550	
Desde la producción de hormigón proyectado - Frecuencia de fabricación de muestras de ensayo	Uno set por día de producción

### 10.3 Frecuencia de ensayo y pruebas

La frecuencia de las pruebas de hormigón proyectado dependerá del tipo de proyecto en consideración, la importancia de la estructura y el volumen total de hormigón proyectado involucrado. La frecuencia de las pruebas se puede especificar tomando como base el volumen de hormigón proyectado consumido, la superficie de shotcrete colocado o el tiempo transcurrido en relación a la duración del proyecto.

Las frecuencias recomendadas para proyectos subterráneos y túneles civiles se dan en la tabla 10.1 (basada en una propuesta de la Asociación Australiana de Shotcrete). Las condiciones de la roca en minería pueden ser más seguras por lo que se podría considerar una menor frecuencia.

Otro enfoque es aquel que entrega la guía EFNARC en su edición de 2009. Esta guía indica que la frecuencia de los ensayos debe ser establecida por el diseñador, teniendo en presente la función del hormigón proyectado (incluyendo la integridad estructural), su vida de diseño, la dificultad de instalación, la clasificación de exposición ambiental y las consecuencias de una falla.

EFNARC Define tres niveles de frecuencia de control (mínimo I, normal II, exhaustivo III), no hay requisitos especiales para la definición en las clases de control I y II. En la clase de control III debe existir una planificación detallada para el proyecto con un ingeniero de control de calidad dedicado a controlar y asegurar la calidad y la frecuencia de los ensayos, y para realizar el análisis de los resultados y mantener reuniones frecuentes para informar de dichos valores, además de la introducción sistemática de mejoras al proceso.

Tabla 10.2 Frecuencia de control, según EFNARC.

Aplicación	Menor	Normal	Extendido
Resistencia a compresión	500	250	100
Resistencia a flexión	-	500	250
Valor de resistencia residual	-	1000	500
Absorción de energía	-	1000	500
Adherencia	-	500	250
Contenido de fibra	-	250	100
Espesor	50	25	10
	m <sup>2</sup> entre ensayos		

## 10.4 Sistema de calidad

### 10.4.1 Generalidades

Cada proyecto en particular debe tener un nivel de requisitos de aseguramiento de la calidad o sistema de calidad. Se debe preparar para cada proyecto un plan de calidad del hormigón proyectado, el que se puede utilizar como un plan independiente o se puede integrar al sistema de calidad general del proyecto.

### 10.4.2 Planificación y aseguramiento de la calidad

Proyectar hormigón de manera exitosa requiere un plan de gestión de calidad detallado y completo que proporcione trazabilidad a todos los aspectos del proceso y permita que el contratista tome medidas eficaces, puntuales y apropiadas si se detecta algún problema (ISO 9001). El aseguramiento de la calidad insta a los contratistas al auto-diagnóstico de los problemas y a la mejora continua de los procesos. El aseguramiento de la calidad no debe ser visto como una carga, sino una oportunidad para aprender acerca de la proyección de hormigón y para mejorar las habilidades y métodos de optimización del rendimiento del hormigón proyectado en su conjunto. El aseguramiento de la calidad es particularmente útil en el entrenamiento del personal, pero solo si ellos están en el circuito de retroalimentación respecto al desempeño y si los registros se auditan y mantienen adecuadamente. En la tabla 10.3 se muestra un ejemplo de un plan básico de control.

### 10.4.3 Registros

Se debe mantener registros precisos del suministro de hormigón y colocación del hormigón proyectado para cada proyecto. Los registros deben incluir, como mínimo, lo siguiente:

- El plan de producción de la planta y de los despachos entregados a la bomba de hormigón/equipo de proyección.
- Listado del personal de operación, conductor, operador y ayudante/asistente.
- En el área de proyección cada día se debe registrar las referencias del lugar, área de proyección y observaciones de la proyección en relación al material y dónde fue colocado el material recibido por el equipo de transporte e identificar si fue más de un equipo el que descargó.
- Los problemas en los equipos que puedan dar lugar a un hormigón proyectado defectuoso.
- Ubicación de las juntas no programadas y su tratamiento.
- Registro de la documentación utilizada (metodologías, instructivos, etc.).

- Informes de auditorías o inspecciones realizadas a los procesos y/o productos.
- Registro de cambios realizados, acuerdos con el cliente, interferencias, etc.
- Registros de equipos utilizados, con sus respectivas calibraciones.
- Registros de pruebas y ensayos, con sus respectivos informes de ensayos.

## 10.5 Alcances de la norma ISO 9001

Es necesario separar las responsabilidades en todo proceso que apunte a la calidad a fin de beneficiar a las partes involucradas. Es así que la norma ISO 9001 propone tres formas o sistemas de control de calidad aplicables a las obras de la industria, para nuestro caso el hormigón proyectado - shotcrete, a saber:

- a. Control de Calidad realizado por el Mandante, este esquema consiste en que el mandante asume la responsabilidad por el control de calidad de todas las actividades y materiales que son elaborados y/o aplicados en un proyecto de construcción, de cualquier tipo.
- b. Control de Calidad efectuado por el Contratista, en este caso el control de calidad de los productos elaborados en la obra y los materiales queda entregado totalmente al contratista, quién debe asegurar el cumplimiento de las especificaciones del proyecto. (autocontrol).
- c. Sistema Mixto, este sistema combina los dos anteriores en el sentido de responsabilizar al contratista directamente por el control (mediante su propio autocontrol) de calidad de la obra y al mandante o a quien éste designe (puede ser la inspección técnica) de verificar y validar que este control se efectúa eficientemente.

Tabla 10.3 Ejemplo de un plan básico de control.

Etapa	Parámetro verificado	Comentarios
Previo al shotcrete	Composición de la mezcla	Predeterminada, basada en la mezcla aprobada.
	Componentes	<b>Áridos:</b> Revisión del tamaño de los áridos, banda granulométrica, finura, ensayos de aceptación, etc. <b>Cemento:</b> procedencia, partidas, ensayos. <b>Aditivos:</b> procedencia, partidas ensayos de compatibilidad, etc. <b>Fibras:</b> procedencia, partidas, ensayos.
	Producción y transporte de hormigón	<b>Planta:</b> evaluación de equipamiento e infraestructura, control y estado. Última verificación de producción y uniformidad <b>Transporte:</b> identificación del medio de transporte, carguío, procedimientos en caso de retraso y para el control de hidratación, descargas, documento de respaldo de traslados y despacho.
	Stock de materiales	Stock y abastecimiento de todos los insumos asociados a la producción de shotcrete y productos relacionados con la proyección.
	Condiciones de almacenamiento	Almacenados de acuerdo a las recomendaciones de los proveedores, considerando clima y temperatura.
	Condición del equipamiento	Mantenimiento preventivo e inspecciones diarias realizadas y evaluadas.
	Servicios y suministros	Chequeados cada uno en particular: agua, luz, ventilación, energía, evacuación de agua, tratamientos de agua y residuos, etc.
	Seguridad	Evaluación de los riesgos asociados, control adecuado y procedimientos de trabajo.
Durante y después del shotcrete	Condición del sustrato	Debe ser revisado y preparado con un estándar adecuado.
	Nivel del acelerante	Cantidad y dosis basada en las condiciones y límites especificados.
	Equipos y operador	Reporte y observaciones de la supervisión. Desarrollo de ensayos de control de instrumentación, calibraciones, capacitación y/o certificación de los técnicos del laboratorio y operadores del equipo. Último mantenimiento de equipos y reporte de los operadores
	Resistencia temprana	Se debe revisar cumplimiento de requisitos de resistencias mínimas antes de volver a reingresar después de la proyección.
	Espesor	Uso de calibres, sondas, perforaciones o lo que se necesite para un correcto control del espesor del shotcrete en el sustrato.
	Rebote	Monitoreo frecuente por parte de los operadores
	Acabado de la superficie	De acuerdo a la inspección visual
	Curado	Curado permanente, monitoreo de los cambios en las condiciones ambientales y su efecto en el shotcrete.
	Muestras de ensayo	Utilizar instalaciones acreditadas (si son cercanas a la faena mantener los riesgos controlados) Disponer del cuidado y mantención de las muestras
	Seguridad	Se debe utilizar siempre una evaluación adecuada del riesgo y procedimientos de trabajo seguros.
Días después del shotcrete	Adherencia	Realizar verificaciones para comprobar que se están alcanzando las especificaciones de adherencia (roca-shotcrete y shotcrete con shotcrete).
	Eficacia de la fortificación.	Supervisar la estabilidad del terreno y la movilidad del sustrato o estado de las barras o deformaciones de la malla.

## Conceptos a tener presente

**Calidad:** Grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos. “Inherente”, en contraposición a “asignado”, significa que existe en algo, especialmente como una característica permanente.

**Control de la calidad:** Parte de la gestión de la calidad orientada al cumplimiento de los requisitos de la calidad.

**Aseguramiento de la calidad:** Parte de la gestión de la calidad orientada a proporcionar confianza en que se cumplirán los requisitos de la calidad.

**Requisito:** Necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria. “Generalmente implícita” significa que es habitual o una práctica común para la organización, sus clientes y otras partes interesadas y que la necesidad o expectativa bajo consideración esté implícita. Un requisito especificado es aquel que está establecido, por ejemplo en un documento. Los requisitos pueden ser generados por las diferentes partes interesadas.

**Trazabilidad:** Capacidad para seguir la historia, la aplicación o la localización de todo aquello que está bajo consideración. Al considerar un producto, la trazabilidad puede estar relacionada con:

- El origen de los materiales y las partes;
- La historia del procesamiento;
- La distribución y localización del producto después de su entrega.

**Inspección:** Evaluación de la conformidad por medio de observación y dictamen, acompañada cuando sea apropiado por medición, ensayo/prueba o comparación con patrones.

**Ensayo/Prueba:** Determinación de una o más características de acuerdo con un procedimiento.

**Verificación:** Confirmación mediante la aportación de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos especificados. El término “verificado” se utiliza para designar el estado correspondiente. La confirmación puede comprender acciones tales como: la elaboración de cálculos alternativos, la comparación de una especificación de un diseño nuevo con una especificación de un diseño similar probado, la realización de ensayos/pruebas y demostraciones y la revisión de los documentos antes de su emisión.

**Validación:** Confirmación mediante la aportación de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos para una utilización o aplicación específica prevista. El término “validado” se utiliza para designar el estado correspondiente. Las condiciones de utilización para la validación pueden ser reales o simuladas.

**Eficacia:** Grado en que se realizan las actividades planificadas y se alcanzan los resultados planificados.

**Evaluación de la conformidad:** Demostración que se cumplen los requisitos especificados relativos a un producto, proceso o sistema, persona u organismo.



# 11

CAPÍTULO

## Métodos de Ensayo

### 11.1 Introducción

Numerosos ensayos se han desarrollado con el fin de determinar las propiedades del hormigón proyectado en los estados húmedo y endurecido. La siguiente es una lista de métodos de ensayo disponibles para la determinación de estas propiedades. La experiencia en el uso regular de cada uno de estos métodos de ensayo aumenta la confiabilidad de los resultados. En Chile los ensayos definidos para hormigón proyectado en general no están normalizados y se han ido adaptando de la experiencia extranjera o recomendaciones de empresas proveedoras de productos o servicios.

Es importante que el laboratorio encargado de realizar los ensayos esté acreditado y que sus técnicos y especialmente quienes desarrollen los ensayos estén capacitados y sus competencias estén certificadas por organismos competentes ajenos al laboratorio donde trabajan.

El Instituto del Cemento y del Hormigón desarrolla programas de capacitación y certificación tanto en la realización de ensayo como en la supervisión de proyectos de shotcrete, los que permiten mejorar las capacidades y habilidades de técnicos y profesionales.

En esta guía se dan recomendaciones respecto a los métodos de ensayo más adecuados, siguiendo las prácticas de la industria en nuestro país y en otras zonas geográficas que cuentan con una extensa experiencia en el tema como son Europa y Australia. En el capítulo bibliografía se puede encontrar un listado de normas de ensayo aplicables al hormigón proyectado. El orden de los ensayos en este capítulo se agrupa de acuerdo a los distintos estados del hormigón proyectado. Se incluye ensayos para hormigón fresco, en estado de fraguado inicial (resistencia temprana) y para hormigón endurecido, finalmente se presentan ensayos o recomendaciones para verificar otros requisitos del hormigón ya colocado o de la faena asociada.

Para cada uno de los ensayos se citan normas tanto chilenas, ASTM, normas UNE, de algún otro país o recomendaciones generales de organismos o instituciones reconocidas en el tema. En algunos casos solo se menciona el número y no el nombre de la norma, para ello se debe revisar en la bibliografía la nómina de normas citadas para este capítulo.

### 11.2 Métodos para la medición del hormigón fresco

Para realizar los ensayos para el hormigón fresco, el laboratorio o técnico destinado para ello, debe realizar en primer lugar la extracción de una muestra de hormigón fresco desde el medio de transporte, según NCh171 o ASTM C172. Se debe considerar que para los siguientes ensayos se requiere una cantidad no inferior a los 30lts, a modo referencial se puede señalar que una carretilla estándar para hormigón posee un volumen suficiente para realizar los ensayos que a continuación se recomiendan.

#### 11.2.1 Asentamiento de cono

La docilidad del hormigón proyectado se mide normalmente de la misma forma que para el hormigón convencional de conformidad con NCh1019 o ASTM C143. El aparato de ensayo debe ser colocado en un terreno liso y debe humedecerse antes de su uso. El hormigón se coloca en el aparato de ensayo, que consiste en un cono troncocónico, el que es llenado en tres capas de aproximadamente igual volumen y cada capa compactada con una varilla de acero dando 25 golpes antes de colocar la capa siguiente.

Después de que se ha completado la capa final la superficie superior se enrasa con un movimiento de enrasado y rolando en sentido inverso al avance. Finalmente se levanta verticalmente el cono, todo esto en un tiempo de aproximadamente 2.5min. La medida en que el hormigón proyectado desciende por debajo de la altura del cono se conoce como "descenso de cono" o "asentamiento" del hormigón y se expresa en cm, según norma chilena o en mm según normas ASTM. Ver figura 11.1.

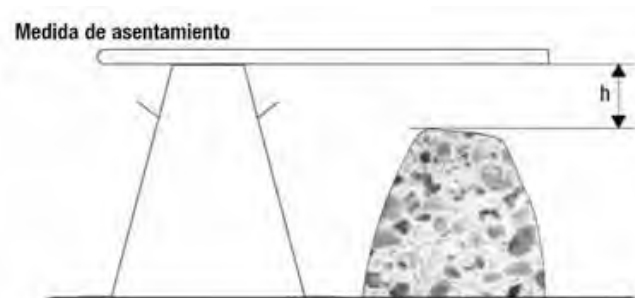


Figura 11.1 Medida del asentamiento del cono.

### 11.2.2 Ensayo de la mesa de sacudidas

El ensayo normado bajo el estándar UNE-EN 12350-5: "Ensayo de la mesa de sacudidas" determina la consistencia del hormigón fresco mediante la medida del esparcimiento del hormigón sobre la mesa de sacudidas. El hormigón fresco se vierte en primer lugar dentro de un recipiente en forma de cono (en 2 capas), se compacta y se enrasa la superficie superior del recipiente. El recipiente se retira entonces cuidadosamente manteniendo la verticalidad en todo momento.

Una vez que ha dejado de escurrir o asentar, la mesa se levanta desde un extremo manual o mecánicamente 15 veces hasta el tope superior y se deja caer libremente hasta que da con el tope inferior.

Finalmente se mide la dimensión máxima del hormigón esparcido en las dos dimensiones paralelas a los bordes de la mesa, pasando a través del centro (Manual del Hormigón SIKA<sup>40</sup>).

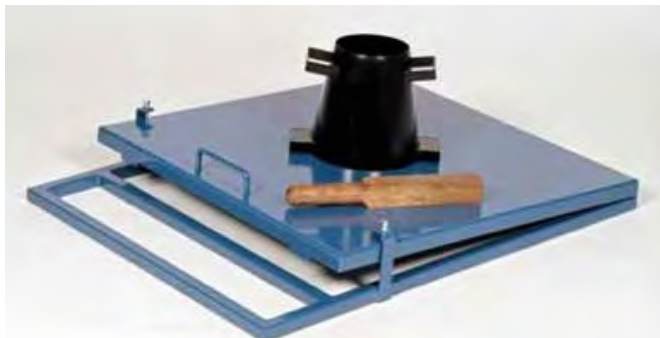


Figura 11.2 Componentes del ensayo de la mesa de sacudidas. Normado por UNE-EN 12350-5. Formado por una mesa, un cono y un pisón de madera.



Figura 11.3 Dimensiones del cono para ensayo UNE-EN 12350-5.

Este ensayo permite observar el "asentamiento dinámico" del hormigón y permite observar la características que el hormigón podría desarrollar dentro de la línea de bombeo, que lleva el hormigón a la boquilla previo a la proyección, producto de la presión de los cilindros contra la mezcla.

La siguiente imagen (Figura 11.4) corresponde a un ensayo realizado por ICH en sus actividades en terreno, en el que fueron evaluadas una serie de muestras. Este método no está normalizado en Chile.



Figura 11.4 Imágenes del resultado de ensayo de la mesa de sacudidas

### 11.2.3 Temperatura del hormigón

Este ensayo está normado bajo ASTM C1064. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura del hormigón fresco con cemento hidráulico. Este método de ensayo proporciona un medio para medir la temperatura del hormigón recién mezclado. La temperatura medida es representativa del momento en que se realiza el ensayo y no es un indicador de la temperatura en un momento posterior. Ver Figura 11.5.



Figura 11.5 Registro y medición de la temperatura.

Esta temperatura debe medirse siempre en un contenedor donde el sensor este cubierto unos 10 cm en todas las direcciones.

### 11.2.4 Densidad

La norma NCh1564 ó ASTM C138 establecen los procedimientos para determinar la densidad aparente y el rendimiento del hormigón fresco. Este método trata sobre la determinación de la densidad del hormigón fresco y entrega las fórmulas para calcular el volumen producido, contenido de cemento y contenido de aire del hormigón. Figura 11.6.



Figura 11.6 Densidad del hormigón fresco.

El procedimiento de llenado es en 3 capas de igual altura y cada capa se compacta con un mazo con 10 a 15 golpes. El enrasado se realiza con placa no absorbente.

### 11.2.5 Contenido de aire

La norma ASTM C231 permite la determinación del contenido de aire en el hormigón fresco mediante el método de presión. Este ensayo es particularmente importante ya que los aditivos incorporadores de aire pueden mejorar o facilitar el bombeo de las mezclas, además de especificarse cuando el hormigón queda expuesto a zonas de ciclos de hielo y deshielo.



Figura 11.7 Medición del contenido de aire.

### 11.2.6 Contenido de fibras

El ensayo está normado bajo el estándar UNE-EN 14488-7 "Contenido en fibras del hormigón reforzado con fibras". Esta parte de la norma Europea especifica un método para la determinación del contenido en fibras del hormigón proyectado a partir de una muestra de hormigón fresco o endurecido, es decir, antes o después del fraguado. Solamente el método que utiliza una muestra fresca es apropiado para fibras poliméricas, mientras ambos tipos, en hormigón fresco o endurecido, son aplicables para fibras de acero.

- **Estado fresco:** el método consiste en tomar una muestra conocida de hormigón proyectado desde el panel (es necesario indicar de donde se extrajo la muestra existiendo la posibilidad de extraer la muestra desde el medio de transporte), tomar su peso (no menor a 2kg.) y luego lavar el material hasta dejar solo las fibras, estas una vez limpias con agua, son secadas y pesadas. El contenido de fibra es proporcional al hormigón despachado. El peso del contenido de fibras de acero se aproxima en 0.1g y para las fibras poliméricas 0.01g.

Para el caso de algunas fibras sintéticas, estas se deben lavar en una solución con alcohol que permita que estas floten para su retiro y secado, lo anterior debe ser verificado con el proveedor de fibras.

- **Estado endurecido:** es necesario reventar una probeta, desmenuzar completamente la probeta de hormigón, extraer la fibra, lavarla con agua, secarla y pesarla. Debido al tipo de ensayo y la adherencia de la fibra polimérica con el hormigón y debido a su composición esta fibra tiende a dividirse en varias fibras lo cual hace muy difícil su extracción completa. Debido a esto último, no se recomienda el conteo de fibra polimérica en hormigón endurecido.

La Asociación de Carreteras de Australia (RTA por sus siglas en inglés) recomienda, para las mediciones en estado fresco una muestra mínima de 6 litros de hormigón fresco y el valor final se aproxima a un valor de 2 gr. El resultado se expresa como el peso de fibras por metro cúbico de hormigón proyectado. Los resultados de este método son muy variables y en la práctica se recomienda un volumen de hormigón mucho mayor.

La dispersión de la fibra durante la proyección es sensible en la toma de muestras, esto se debe a varios factores, desde la homogeneidad en el carguío, la distribución en la masa en mezclado, homogeneidad en el vehículo de transporte y la descarga en la tolva de la bomba. Por tanto, la muestra es sensible a estos aspectos además de la técnica de colocación del operador y sus niveles de rebote.



## 11.3 Métodos para la medición de la resistencia temprana

### 11.3.1 Generalidades

Las muestras en cilindros y testigos son generalmente inadecuadas para la medición de la resistencia a la compresión a edades antes de las 48 horas. Existen otros métodos de medición de la resistencia a la compresión del hormigón proyectado por medios indirectos los que pueden ser utilizados sin inconvenientes. Se describe a continuación un resumen de los métodos disponibles de prueba a edad temprana.

La medición del desarrollo de la resistencia a edad temprana es apropiada para la evaluación de la capacidad del hormigón proyectado para soportar un terreno inestable y proporcionar una índice para calcular el tiempo de reingreso al área de trabajo con cierta seguridad.

El tipo más apropiado de ensayo para medir la resistencia temprana a la compresión en hormigones con hasta 1 MPa es el penetrómetro de aguja.

El “penetrómetro de suelo” proporciona una sobreestimación de la resistencia a la compresión, a menos que los resultados se corrijan utilizando el método de Bernard y Geltinger<sup>41</sup>, debido a que no es un método usado en Chile no será desarrollado.

El método de la “pistola Hilti” para medición de resistencias de 1.0 MPa requiere operadores calificados para su uso. Esta funciona mediante la entrega de energía por disparos.

La resistencia del hormigón proyectado a corta edad se evalúa en general en intervalos de 0.2MPa a 1,2MPa y de 3MPa a 16MPa con dos métodos diferentes, bajo la norma EN 14488-2. El “método a” es conocido como “penetración de aguja” (penetrómetro) y el “método b” como “hincado de clavos” (Hilti).

Para resistencias mayores, lo que corresponde es la extracción de testigos y medición de compresión, por sobre las 24 horas, la resistencia del hormigón ya permite su medición a compresión directa. La siguiente figura ejemplifica mejor las resistencias del hormigón y los métodos recomendados para su medición.

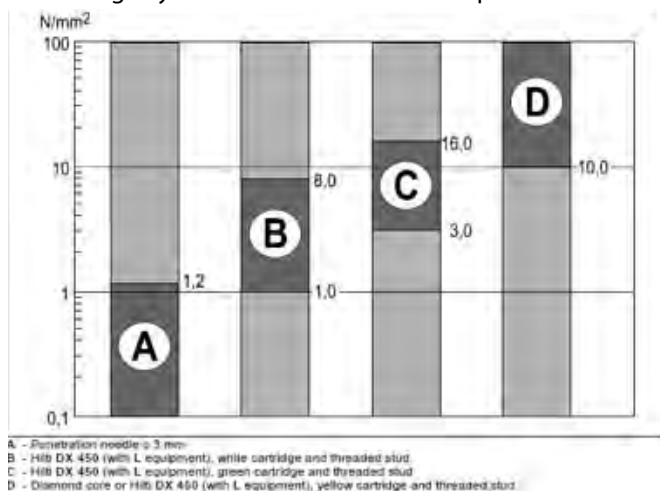


Figura 11.8 Métodos recomendados para medición de la resistencia a compresión en el hormigón a edad temprana.

### 11.3.2 Penetrómetro de aguja

Este método se utiliza para medir la fuerza requerida para empujar una aguja de dimensiones específicas para que penetre en el hormigón proyectado hasta una profundidad de  $15 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . El penetrómetro indica la fuerza realizada, por compresión de un “resorte” calibrado, de la cual puede deducirse la resistencia a compresión estimada a partir de una curva de conversión, la que es suministrada por el fabricante del equipo de ensayo.

La aguja debe tener un diámetro de  $3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  y una punta con ángulo de  $(60 \pm 5^\circ)$ . No se requiere una probeta especial para ensayo, sin embargo se requiere una capa de hormigón de no menos de 100 mm de espesor.

El procedimiento indica una aplicación perpendicular a la superficie y se presiona regularmente de una sola vez hasta una profundidad de 15 mm. Si la penetración de la aguja se ve impedida, se suspende la aplicación y se repite en una posición diferente. Para cada carga se debe limpiar la aguja si es necesario. Se repite el ensayo lo más rápido posible con un mínimo de 10 lecturas. Para resistencias bajo los 0.5MPa las lecturas se deben realizar en 1 min. Se debe registrar el tiempo de inicio y termino del ensayo.



Figura 11.9 Modelos de penetrómetro tradicional para hormigón y uno más moderno con lectura digital. En ambos casos el principio de lectura es el mismo, así como la necesidad de calibración.



### 11.3.3 Hincado del clavo - pistola HILTI

Se hincan clavos dentro del hormigón proyectado y se determina la profundidad de penetración. A continuación se extrae y se mide la fuerza de extracción. La relación entre la fuerza de extracción y la profundidad de penetración se utiliza para obtener una estimación de la resistencia a compresión a partir de la curva de conversión, la que es suministrada por el fabricante del equipo de ensayo. La profundidad de penetración del clavo debe ser al menos de 20 mm.

El equipo recomendado es Hilti DX450, el que dispone de todos los insumos y accesorios para este tipo de ensayo.

El equipo debe disponer de un elemento para la extracción, capaz de aplicar una fuerza de tracción al clavo transmitiendo la reacción a la superficie del hormigón a través de un anillo de sujeción.

Se deben disparar a lo menos 10 clavos correctamente insertados en profundidad (mínimo 8), a una distancia entre clavos de no menos de 80 mm. Se debe buscar la mejor relación longitud de clavo y color del cartucho de disparo. Con este método se puede llegar hasta los 18MPa sin dificultad.



Figura 11.10 Método de la pistola Hilti.

### 11.3.4 Extracción y ensayo de testigos

La extracción de testigos y ensayo de testigos permite medir la resistencia del hormigón a partir de aproximadamente 10 MPa, es un método que permite medir la resistencia temprana cuando las resistencias superan el umbral de los 10 MPa y también la resistencia a compresión del hormigón a edades más avanzadas.

La resistencia a la compresión se determina a través de testigos perforados en el hormigón según NCh1171.

### 11.4 Métodos para la medición de la resistencia en hormigón endurecido

El término “pruebas de resistencia” se utiliza en adelante de forma genérica para referirse a toda una serie de métodos de ensayos, existiendo diferentes tipos de probetas, vigas o paneles, en diferentes países.

En Australia la prueba de resistencia más común para el control de calidad de hormigón proyectado reforzado con fibras es la establecida en ASTM C1550, utilizando un panel redondo de diámetro 800mm y 75mm de espesor. Una alternativa frecuente en Chile es el panel de 100 x 600 x 600 mm, panel cuadrado de acuerdo a la norma EN 14488-5 (también mencionado en la Guía de EFNARC).

Si se especifican las pruebas de viga, se especifica la prueba preferida en la norma EN 14488-3 utilizando una viga de 75 x 125 x 600 mm cargada en el tercio central; la alternativa es usar vigas cuyas dimensiones son de 100 x 100 x 350 mm o 150 x 150 x 500 mm según ASTM C1609.

La ventaja principal de los paneles es la menor variabilidad de los resultados en comparación con las vigas. El nivel típico de variación para un lote de muestras de tenacidad usando el panel redondo ASTM C1550 es de aproximadamente un 7% y el de la norma EN 14488-5 en paneles cuadrados es de aproximadamente 10% (Bernard<sup>42</sup>).

Bernard<sup>48</sup> ha demostrado que existe una correlación entre el desempeño posterior a la grieta de la norma EN 14488-3 de vigas y de ASTM C1550 en paneles, la que puede ser usada para obtener los datos de diseño post agrietamiento en flexión de hormigón proyectado reforzado con fibras basándose en el panel de pruebas ASTM C 1550.

En principio las vigas sólo debieran especificarse o recomendarse cuando se requiere una estimación directa del módulo de rotura y de la resistencia a la flexión residual del hormigón proyectado reforzado con fibras.

Las vigas EN 14488-3 son la única opción práctica para probar la tenacidad en recubrimientos de shotcrete con espesor menor a 100 mm.

La viga EN 14488-3 también tiene la ventaja que es más representativa del comportamiento de revestimientos de hormigón proyectado cuando el espesor no supera 75 mm. El nivel típico de la variabilidad por lote para valores de tenacidad es de aproximadamente un 12% con pequeños anchos de fisura (0,5 mm de deflexión central) que van hasta el 20% para los anchos de fisura más grandes (3,0 mm de deflexión central). En la elección del método de ensayo a utilizar para un proyecto, se debe considerar el espesor de la muestra con relación al espesor a proyectar. El método de prueba apropiado debe ser seleccionado por el ingeniero o experto geomecánico.

### 11.4.1 Ensayo en panel redondo según ASTM C1550

Este método de ensayo considera un panel de espesor de 75 mm y de 800 mm de diámetro. El panel se apoya en tres pivotes dispuestos simétricamente alrededor de su circunferencia y se carga en el centro (Figura 11.11).

El panel debe ser muestreado en estado fresco en terreno, proyectado sobre dicho panel y enrasado con un "regla" o "viga" con apoyo en las aristas del panel, inmediatamente una vez terminado. Debe ser cubierto y protegido de la intemperie como inicio de su proceso de curado hasta el traslado al laboratorio. Debe contener un bastidor lo suficientemente fuerte para levantarlo y trasladarlo sin daño.

El comportamiento después de la grieta en el panel circular puede ser representado por la energía absorbida por el panel hasta la deformación solicitada.

En este método de ensayo la energía absorbida de un hormigón reforzado con fibra hasta una deflexión especificada se toma como la capacidad para redistribuir el esfuerzo tras el agrietamiento.

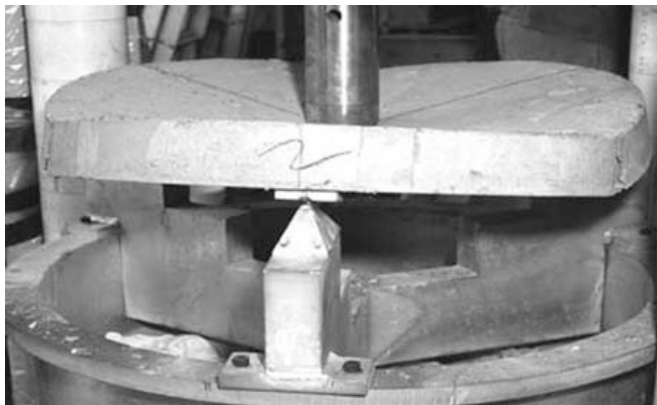
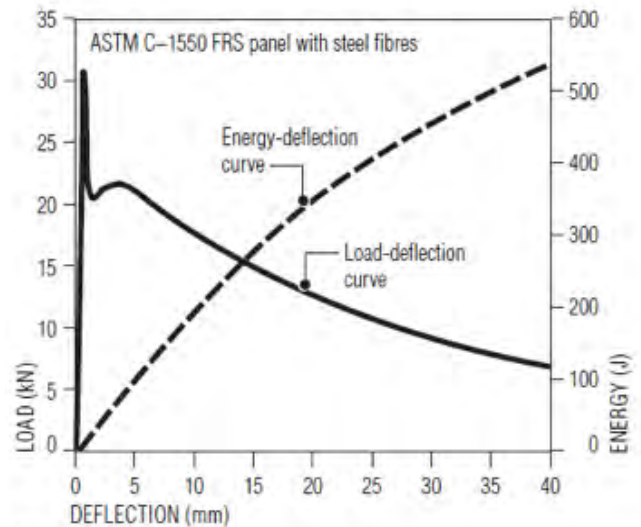
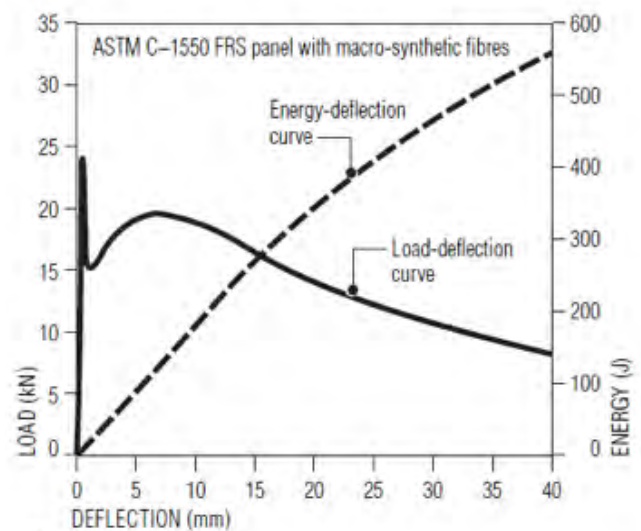


Figura 11.11 Panel ASTM C1550. Se muestra un ensayo de carga en desarrollo.

La selección de la deflexión más apropiada a la que se especifica depende de la aplicación prevista para el shotcrete. Bajos niveles de deformación son apropiados para aplicaciones en las cuales se esperan bajos niveles de deformación y controlan las condiciones de servicio mientras que el desempeño para grandes niveles de deformación es apropiada cuando se esperan o permiten grandes deformaciones en la estructura y priman los requisitos de resistencia y capacidad de deformación. La energía absorbida desde 1 a 5 mm después de la grieta es aplicable a las situaciones en que se requiere que el shotcrete mantenga las grietas herméticas con bajos niveles de deformación. Ejemplos de esto incluyen revestimientos finales en estructuras civiles subterráneas como túneles ferroviarios en los que se requiere permanecer hermético con una deformación máxima de 40mm.



(a)



(b)

Figura 11.12 Ejemplos de curvas carga deformación obtenidas con el ensayo en panel ASTM C1150 con fibra metálica y microfibras sintéticas.

En relación al muestreo, se deben preparar al menos tres muestras para cada lote de hormigón o de hormigón proyectado. Una muestra está compuesta por un mínimo de dos pruebas exitosas. Una prueba con éxito implica al menos tres grietas radiales. Los especímenes fallan cuando se produce un "rayo" que implica una sola grieta en toda la muestra que se caracteriza por una baja absorción de la energía. En este caso el resultado de esta prueba se descarta.

Es importante que el equipo tenga un adecuado servo-control para aplicar las cargas controlando los desplazamientos. El desempeño de la curva carga - deflexión se calcula como la energía absorbida medida en Joules.

### 11.4.2 Ensayo en panel cuadrado según EN 14488-5

Esta prueba consiste en el ensayo de un panel de hormigón de dimensiones 600x600x100 mm (+5/-0) de espesor simplemente apoyado en los cuatro bordes mientras se somete una carga en el punto central (Figura 11.13). La curva de carga - deflexión

se obtiene hasta una deflexión central de 25 mm (Figura 11.14). El resultado del ensayo se calcula como la energía bajo la curva de carga - deflexión medida en Joules.

En relación al muestreo, se deben preparar al menos tres muestras. Una muestra está compuesta por un mínimo de dos pruebas exitosas.

El panel debe ser muestreado en estado fresco en terreno, proyectado sobre dicho panel y enrasado con un "regla" o "viga" con apoyo en las aristas del panel, inmediatamente una vez terminado.

Estas probetas deben curarse por 3 días inmediatamente antes del ensayo y deben mantenerse húmedas hasta el ensayo. Esto quiere decir, que se deben mantener en molde al menos 16 horas y no más de 3 días, a una temperatura de 20°C. Después del retiro de los moldes curarlas en agua a 20°C o en cámara a 20°C y humedad del 95%.

Algunas investigaciones han mostrado que para macro fibra usada como refuerzo en hormigón proyectado, la energía absorbida por una mezcla dada en el ensayo EN 14488-5 a 25mm de deflexión central es aproximadamente 2,5 veces la magnitud de la energía absorbida por la misma mezcla en la norma ASTM C1550 en 40 mm de deflexión central (Bernard<sup>43</sup>).



Figura 11.13 EN 14488-5 Ensayo panel cuadrado para absorción de energía.

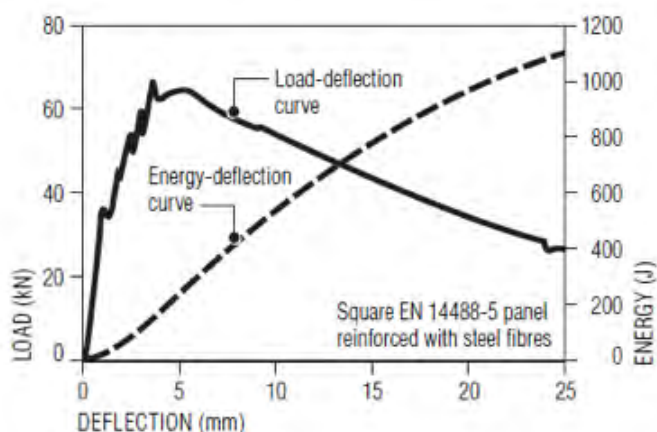


Figura 11.14 Ejemplo de curva de deformación obtenidas con el ensayo en panel EN 14488-5 con fibra metálica.

### 11.4.3 Resistencia a la flexión y resistencia residual

La resistencia a la flexión del hormigón proyectado puede determinarse utilizando vigas aserradas de paneles. Si los paneles no están disponibles entonces estas vigas pueden ser aserradas de las obras en el lugar de proyección, pero esto es costoso, difícil y por lo general no es una práctica común. El tamaño preferido de la viga es de 100 x 100 x 350 mm o 150 x 150 x 500 mm extraídos de acuerdo con la norma ASTM C1140 y probados de conformidad con la norma ASTM C78.

Si se requiere la resistencia a la flexión de hormigón proyectado reforzado con fibras, se debe extraer vigas de medida 100 x 100 x 350 mm o 150 x 150 x 500 mm en conformidad con la norma ASTM C 1140 y se ensaya de acuerdo con ASTM C1609. Si se utiliza el tamaño indicado del EN 14488-3 la muestra se debe cortar a 75 x 125 x 600 mm.

También se pueden utilizar muestras moldeadas de hormigón proyectado con estos tamaños de vigas, pero el comportamiento de este tipo de muestras no se debe tomar para representar el desempeño de hormigón proyectado colocado, por lo que no son recomendables.

#### Ensayo en viga ASTM C 1609

En este método, la viga es cargada en dos tercios del centro, posee dimensiones de 100 x 100 x 350 mm o 150 x 150 x 500 mm, se somete a una carga de flexión (Figura 11.15). La curva carga-deformación derivada de esta prueba se puede utilizar para determinar el módulo de ruptura que representa la resistencia a la flexión del hormigón y la resistencia residual o absorción de energía para el caso del hormigón proyectado reforzado con fibras.

Estas vigas son cada vez menos requeridas porque sus resultados generan mucha dispersión para un mismo hormigón.

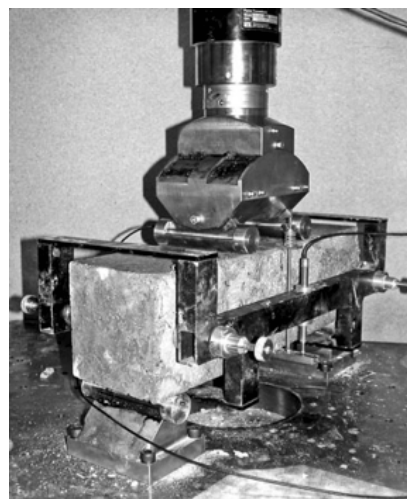
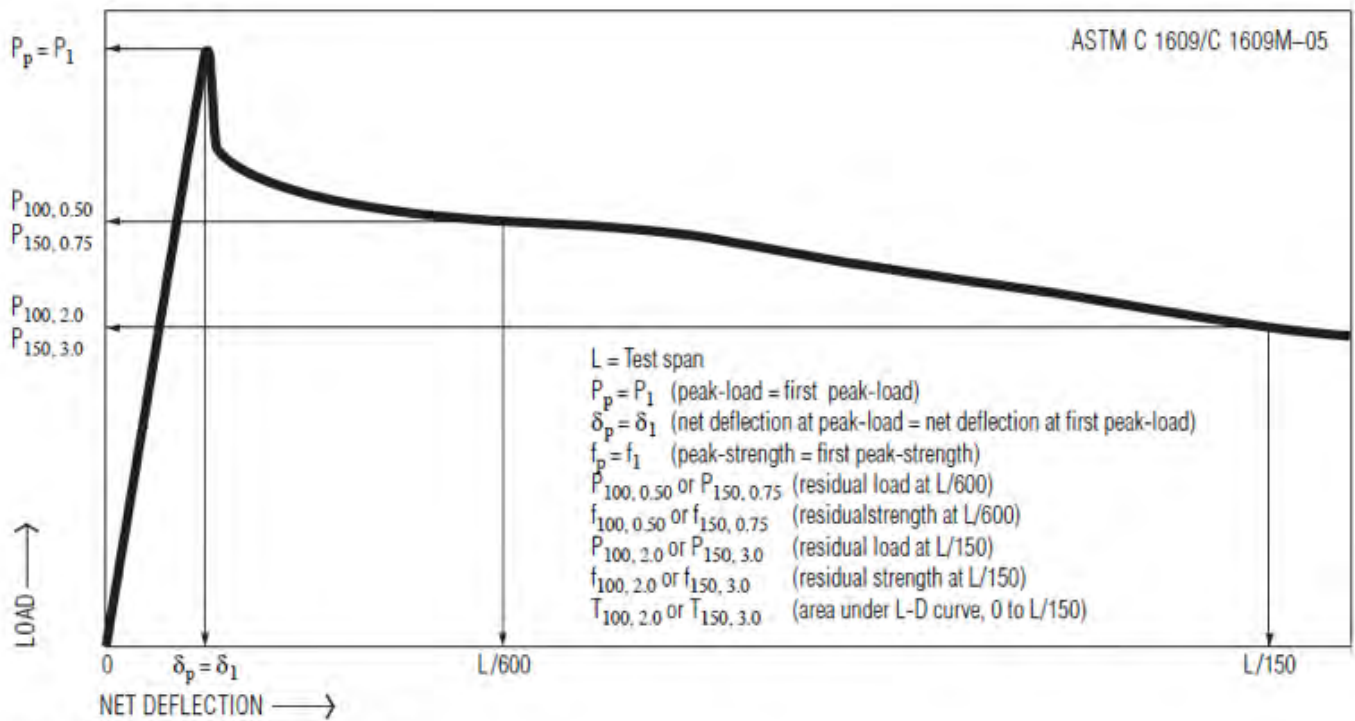


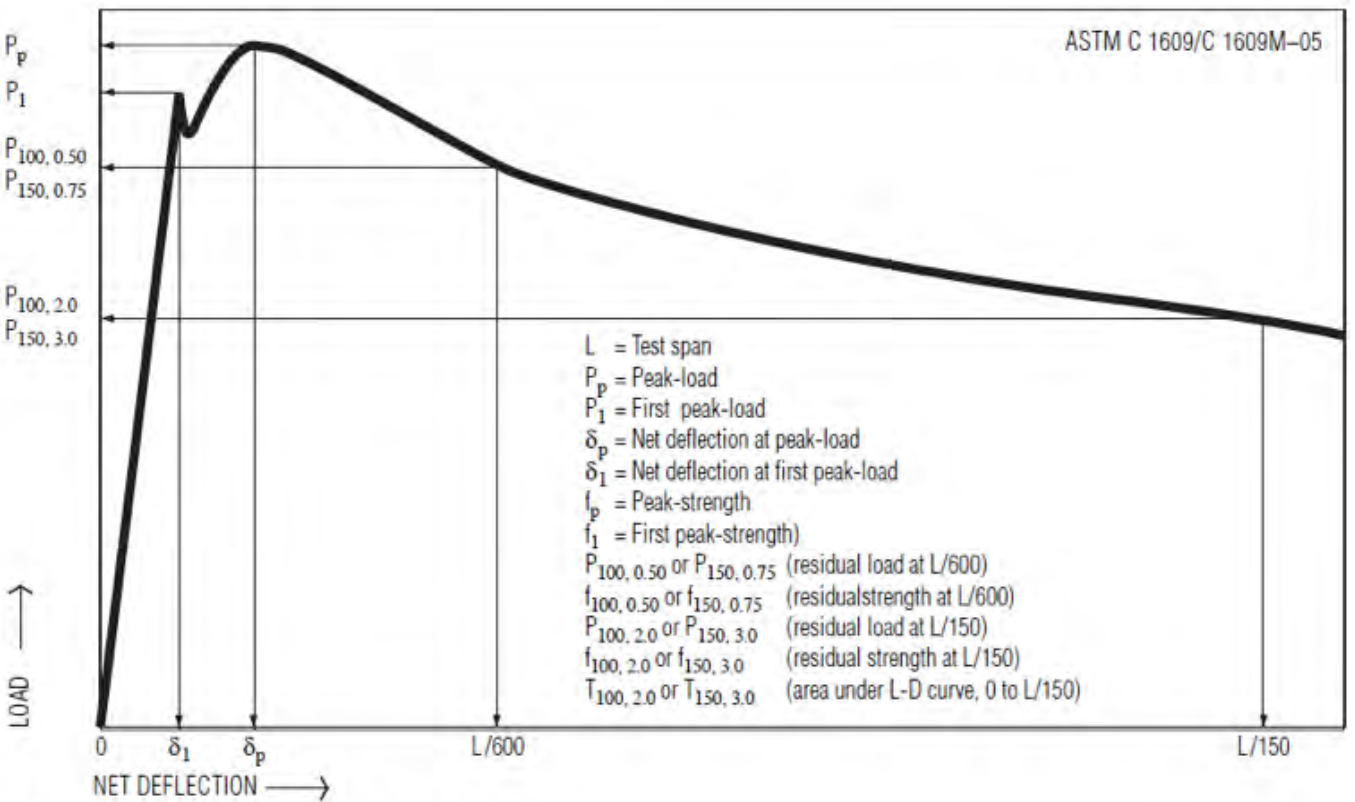
Figura 11.15 Ensayo ASTM C1609.

Una muestra para este ensayo se comprende de 3 vigas. La curva de carga típica para vigas con fibra de refuerzo se presenta en la Figura 11.16 donde se indican los parámetros que se extraen de este ensayo.





(a) PEAK-LOAD EQUALS FIRST PEAK-LOAD



(b) PEAK-LOAD GREATER THAN FIRST PEAK-LOAD

Figura 11.16 Curvas típicas del ensayo ASTM C 1609 con los resultados para dos contenidos de fibras.



### Ensayo en viga EN 14488-3

El ensayo de la viga EN 14488-3 implica una carga a los tercios. Esta viga es extraída de un panel y es aserrada con dimensiones de 75 x 125 x 600 mm se apoya con una luz de 450 mm (figura 11.17). La ventaja de una altura de viga más reducida es una viga más flexible y menos exigente con la máquina de prueba.

Estas vigas son cada vez menos requeridas porque sus resultados generan mucha dispersión para un mismo hormigón y desempeño.

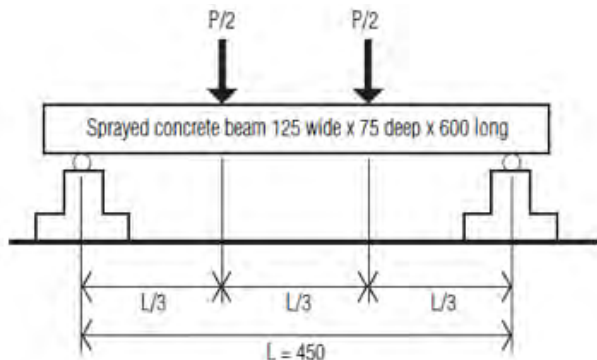


Figura 11.13 EN 14488 Ensayo de viga según EN 14488-3

Este ensayo también tiene un mínimo de 3 probetas para conformar una muestra. Los resultados reportados son el primer máximo de carga, la carga de rotura junto a los valores de resistencia a la flexión asociados.

### 11.4.4 Penetración de agua

La medición de la penetración de agua o impermeabilidad se puede realizar bajo NCh2262.

Esta prueba consiste en la extracción de un testigo de diámetro 150mm del hormigón proyectado, el que es aserrado para revelar una cara plana perpendicular a la dirección de la perforación.

El ensayo de permeabilidad da una medida de la resistencia del hormigón contra la penetración de agua. Las probetas de hormigón son expuestas a una presión de agua dada La norma chilena detalla una presión de agua de 0.1 MPa de 0 – 48 h; de 0.3 MPa desde 48 – 72 h y de 0.7 MPa desde 72 – 96 h. Las muestras se consideran fallidas si el agua penetra a través de la superficie opuesta o a través de los lados. Un ejemplo de la configuración de la prueba se puede ver en la Figura 11.18.



Figura 11.18 Ensayo de permeabilidad NCh2262.

Inmediatamente después de este período las muestras se cortan y se mide la profundidad de penetración de agua.

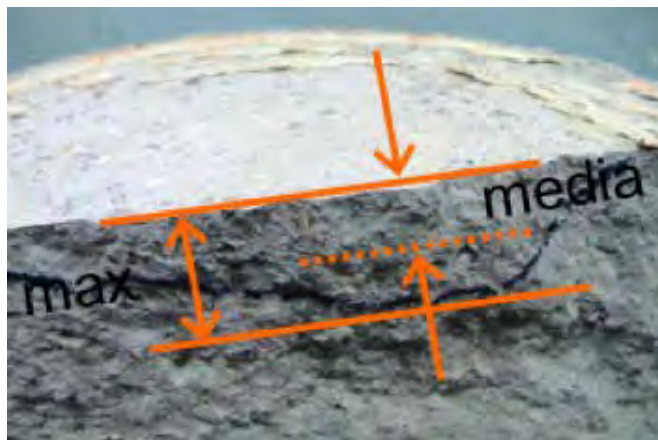


Figura 11.19 Medición de la permeabilidad.

Los resultados de esta prueba pueden verse seriamente comprometidos por la presencia de grietas en la muestra las que pueden ser causadas por la retracción, el desprendimiento después de la proyección o problemas de compactación atribuibles al operador.

### 11.4.5 Resistencia a la adherencia

La adherencia es una propiedad muy difícil de medir. Todos los métodos de ensayo existentes implican equipos patentados para la extracción de un testigo de hormigón proyectado en el lugar. La resistencia de adherencia entre el hormigón proyectado y el sustrato subyacente puede determinarse de conformidad con la Sección 10.6 de la “Guía de Especificación Europea para Hormigón Proyectado de EFNARC.

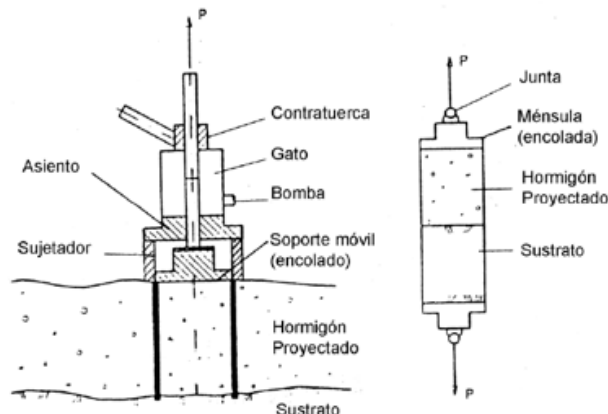


Figura 11.20 Ensayo de adherencia descrito por la guía EFNARC.

Una prueba alternativa para la determinación de la resistencia de adherencia, es la norma sueca SS 137243. El método EFNARC implica la extracción de un testigo en tracción directa desde una única perforación central (Figura 11.20) mientras que el método de la norma sueca SS 137243 implica la realización de dos perforaciones centrales concéntricas y el uso de un dispositivo de extracción que asegura una carga concéntrica (Figura 11.21). Este método tiene la ventaja de que los momentos que se aplican al testigo durante la extracción son mínimos, por lo tanto, el resultado es más representativo de la verdadera resistencia de adherencia del hormigón proyectado.

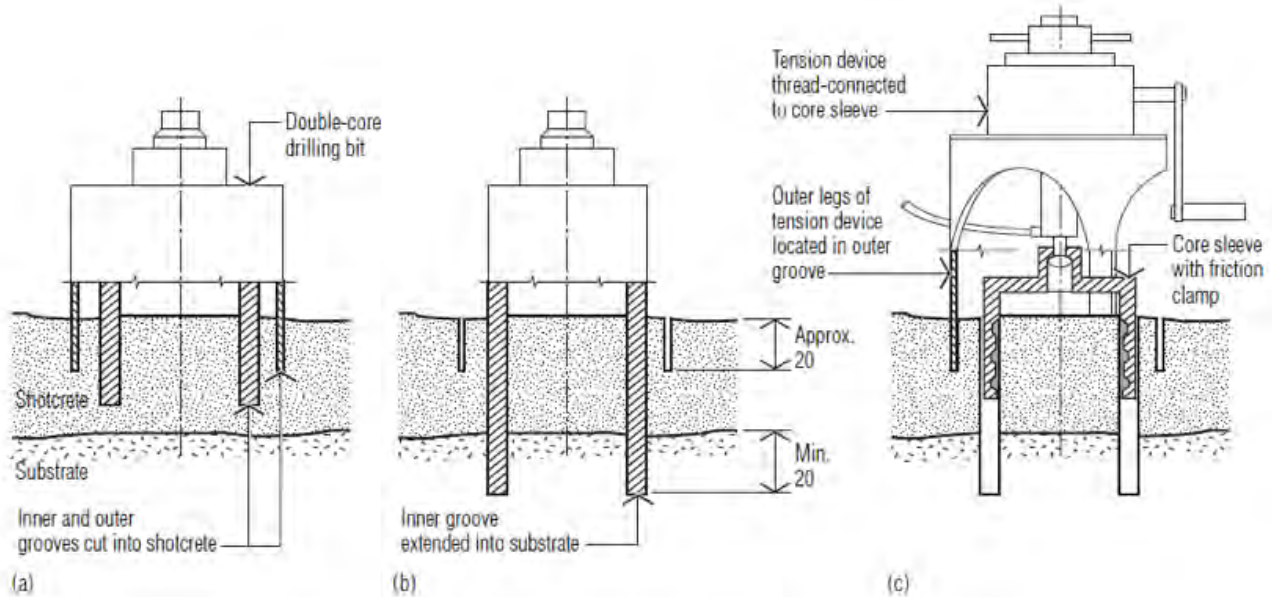


Figura 11.21 Ensayo de adherencia descrito en la norma sueca SS 137243.

## 11.5 Otros ensayos y mediciones

Los siguientes ensayos para shotcrete no son de uso común como parte de las especificaciones tradicionales en nuestro país. Sin embargo, son ensayos de uso frecuente en países con un mayor desarrollo de la construcción con hormigón proyectado y son solicitados junto a los previamente mencionados con el fin de lograr un alto estándar de desempeño y durabilidad.

### 11.5.1 Resistencia al ciclo de hielo y deshielo

La resistencia a la congelación y descongelación de hormigón endurecido debe ser determinada de acuerdo con la norma ASTM C666. Si se espera que la superficie del hormigón proyectado sufra exposición a la sal, además de la acción de hielo y deshielo, entonces la resistencia del material debería evaluarse utilizando la norma ASTM C672. Si se especifica un contenido de aire adecuado en el hormigón proyectado este va a satisfacer las pruebas de congelación-descongelación sin dificultad. Se debe tener en cuenta que la resistencia al ciclo de hielo y deshielo es solo un problema si se espera que el hormigón proyectado este expuesto a este ciclo.

### 11.5.2 Espesor

El espesor es clave en una obra de shotcrete, ya que el diseño de una fortificación depende de alcanzar el espesor requerido. La norma "EN 14488-6" entrega un procedimiento para esta medición.

Es muy simple, en hormigón endurecido, se perforan agujeros al sustrato o se extraen testigos. Se mide entonces la profundidad de los agujeros o testigos.

Se deben perforar por lo menos cinco agujeros espaciados  $600 \pm 50$  mm, en dos líneas de tres en ángulo recto como se muestra en la Figura 11.22.

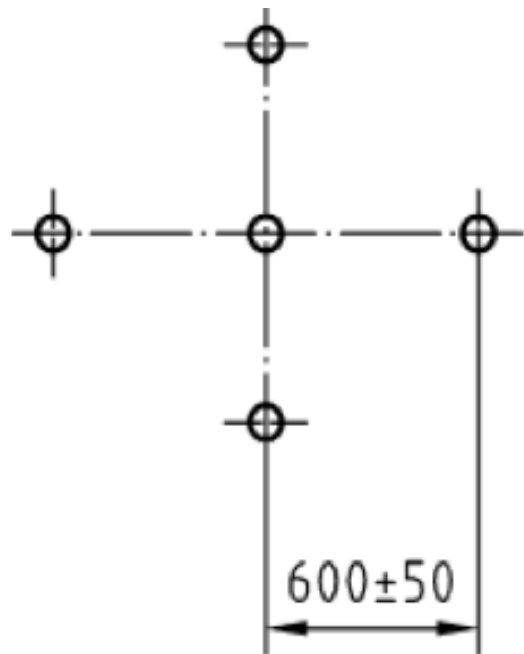


Figura 11.22 Cuadrícula para perforaciones o extracción de testigos para medición de espesor según "EN 14488-6".

La norma no describe ni define el área a analizar, la extensión de las pruebas o los requisitos respecto de los resultados. Una vez perforado y definido el instrumento para medir la profundidad, hay que realizar las mediciones y registrarlas en mm. Se debe informar el lugar y punto, el espesor mínimo, máximo y promedio siempre en mm.

Otros métodos de medición de espesor están asociados al uso de equipos topográficos o haz láser que escanea el área antes y después de la proyección de shotcrete, lo que permite visualizar las diferencias de espesor en el área.

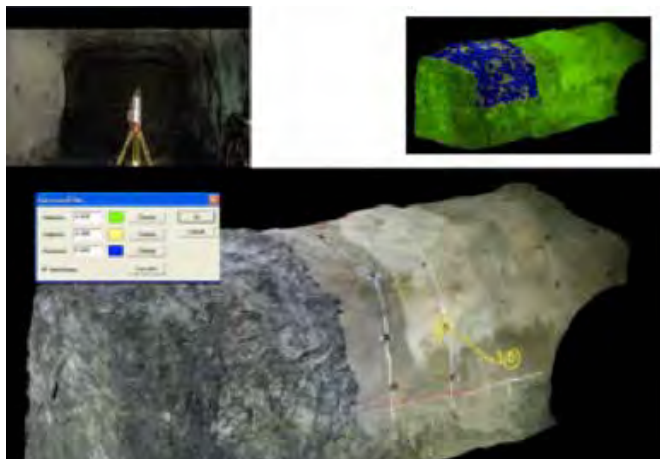


Figura 11.23 Ejemplo de registro de espesor mediante estación total.

Una solución más avanzada es la que poseen algunos equipos de fabricación europea como el equipo Meyco de Atlas Copco modelo Potenza, el que posee un escáner en el brazo de proyección, permitiendo escanear antes y después de la proyección, confeccionar un perfil del área proyectada y definir el área donde no se alcanzó el espesor deseado.

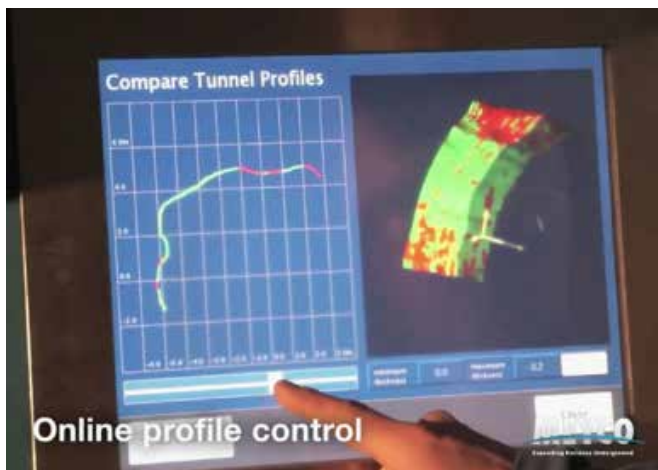


Figura 11.23 Atlas Copco-Meyco Potenza y su pantalla que permite visualizar el perfil del túnel antes y después de la proyección, indicando las áreas en que falta espesor.

### 11.5.3 Medición de la proyección y rebote

Determinación de la proyección de salida y del rebote. Antes de comenzar una proyección de shotcrete es necesario establecer con precisión cual es el volumen y masa de hormigón que se proyecta, ya que afecta a la exactitud de la determinación de rebote. La cantidad de rebote debe ser determinado por separado.

Cada equipo a excepción que sea relativamente nuevo, poseen un caudal de salida diferente y sujeto a cambios por falta de mantenimiento o desgaste de partes y piezas con el tiempo.

#### Determinación del hormigón de salida

La cantidad total de hormigón proyectado descargado desde la boquilla durante un cierto período de tiempo (tiempo de proyección) se determina mediante el peso de la masa proyectada.

### Determinación de rebote

Un método que consume mucho tiempo, pero es preciso, consiste en recoger el rebote en una lona que se extiende frente a la proyección de hormigón, se almacena en un recipiente adecuado y se pesa. Si se conoce el tiempo de proyección y la masa de rebote (convertida en kg/h), el porcentaje de rebote con respecto a la masa inicial se puede calcular fácilmente.

Para la medición del rebote en laboratorio, el hormigón proyectado se aplica a un molde de madera preparado con una capa de sello de hormigón proyectado previo (tamaño de encofrado en función de la unidad pesada); el rebote se recoge sobre una lona y se pesa. La masa de hormigón proyectado se calcula restando la masa inicial del encofrado de la masa total (hormigón de rebote + encofrado rociado).

El proceso concluye presentando la siguiente información complementaria al proceso de las mediciones:

- Caudal de la bomba de hormigón.
- Presión de aire.
- Caudal del acelerante.
- Ángulo y distancia del sustrato.
- Espesor del shotcrete.
- Temperatura de la mezcla.
- Tiempo de proyección.
- Descarga de agua y presión en la boquilla.
- Relación agua / cemento.
- Caudal efectivo proyectado desde la boquilla.
- Ubicación del sustrato.
- Características de las instalaciones o en el laboratorio de medición.

### 11.5.4 Compatibilidad del cemento con el aditivo

La guía EFNARC en el punto 6.3.2 recomienda un procedimiento para verificar la compatibilidad del aditivo acelerante y el cemento mediante los tiempos de fraguado, denominado "determinación del tiempo de fraguado para hormigón proyectado con aditivo acelerante". Se deben usar pastas de cemento de referencia con aditivo (mezcla de prueba) y sin aditivo (mezcla de control). Para el ensayo de tiempo de fraguado se utiliza el aparato de Vicat. El ensayo del tiempo de fraguado en este caso busca ver la compatibilidad entre cemento y aditivo considerando el tiempo de fraguado de las distintas dosis de acelerante y tipo de cemento. El detalle de esta prueba se puede ver en anexo.





# 12

## CAPÍTULO

### Clases de Resistencia Temprana del Hormigón Projectado

Las propiedades del hormigón proyectado cambian considerablemente durante su rápido fraguado. El hormigón proyectado tiene un mayor contenido de cemento y además contiene normalmente aditivos acelerantes de fraguado lo que genera diferencias de comportamiento respecto al hormigón convencional.

Una vez proyectado este hormigón tiene la ventaja de adquirir resistencia rápidamente en especial cuando se proyecta sobre un sustrato sin presencia de armadura o refuerzo.

La norma Europea UNE-EN 206-1 detalla las propiedades del hormigón y hace mención en el caso del hormigón proyectado a las clases de resistencia temprana.

Esta práctica fue adoptada a partir de la experiencia de la Sociedad del Hormigón de Austria y su Guía de Hormigón Projectado<sup>38</sup>. De acuerdo a dicha guía, las propiedades tienen que ser indicadas en las especificaciones técnicas y administrativas del contrato y en el programa de ejecución del proyecto, en el programa de ensayos y ser descritas mediante el uso de breves designaciones o nomenclaturas. Estas clases y resistencias pueden ser modificadas durante el proyecto según las condiciones de trabajo, no son estrictas y pueden estar sujetas a cambios de común acuerdo entre el contratista y diseñador.

A continuación se realiza una breve descripción de las clases de hormigón proyectado y luego se indican.

Todas las tablas, gráficos y menciones de este capítulo, fueron extraídos de la versión 2013 de la Guía Austriaca de Hormigón proyectado<sup>38</sup>.

#### 12.1 Clases de hormigón proyectado

Las clases de hormigón proyectado tienen su fundamento en considerar la función estructural a la que estará sometido, el nivel de riesgo, los requisitos de durabilidad y la vida útil de diseño.

La guía determina la clase de inspección que se debe realizar a este tipo de hormigón y asocia a dicho hormigón, clases de exposición (ver tabla 7-1<sup>38</sup>).

(SpC I) Hormigón proyectado con bajos requerimientos. Solamente para bajos requisitos y solicitudes de desempeño (clase de resistencia, durabilidad, etc.) y cuando existe un bajo nivel de riesgo. Por ejemplo, el sellado de soportes.

(SpC II) Hormigón proyectado con los requisitos normales. Requisitos normales para las propiedades de desempeño y existe un nivel normal de riesgo. Por ejemplo en hormigón proyectado para la construcción de túneles como revestimiento primario, para asegurar y apoyar la roca circundante, que se mantenga en su lugar de forma permanente y usado solo o en combinación con capas internas u otros revestimientos o capas subsecuentes.

(SPC III) Hormigón proyectado con requisitos especiales. Este hormigón proyectado está destinado a construcciones con un alto nivel de riesgo y/o requisitos especiales de durabilidad. Se aplica para el revestimiento primario y secundario de las estructuras de túneles en roca blanda, para revestimientos de túneles en varias capas.

Cuando se especifica hormigón proyectado de la clase SpC III además se especifica normalmente una alta resistencia a la penetración de agua.

#### 12.2 Clases de resistencia temprana

El hormigón proyectado fresco se define como tal mientras esta dentro de las 24 horas de proyectado.

Si el hormigón fresco tiene que cumplir ciertos requisitos en términos de desarrollo de la resistencia, estos se especifican de acuerdo a clases de resistencia temprana denominadas J1, J2, J3 (ver Figura 12.1).

El hormigón proyectado J1 es adecuado para la colocación de capas delgadas sobre un sustrato seco y sin requisitos especiales de soporte de carga y ofrece la ventaja de baja formación de polvo y rebote.

Si el hormigón proyectado se va a colocar en capas gruesas (incluida sobre cabeza) a un alto rendimiento, se requiere un desarrollo de la resistencia del tipo J2. Lo mismo se aplica a las ubicaciones con filtración de agua y aplicaciones que

implican la carga inmediata debido a las operaciones subsiguientes, por ejemplo perforación para anclaje o vibraciones por tronadura.

Los requisitos J2 también se han de cumplir en el caso de necesidad de rápida resistencia debido a la presión de rocas, presión del suelo o de las cargas por gravedad. La especificación de la gama requerida depende también del grado de utilización del hormigón proyectado fresco.

Debido a la gran formación de polvo y de rebote, el hormigón proyectado J3 solo se debe especificar en circunstancias especiales (por ejemplo una fuerte entrada de agua).

El desarrollo de la resistencia durante los primeros minutos también tiene una gran influencia en el grado de formación de polvo y rebote. Si la resistencia crece demasiado rápido, el hormigón proyectado se endurece al instante tras impactar la superficie receptora, lo que evita la incrustación adecuada de las partículas de grano grueso de la proyección posterior. Ante la presencia de una fuerte entrada de agua o sobre un sustrato desfavorable, se debe solicitar una mayor resistencia después de unos pocos minutos, lo que sin embargo, implica una mayor cantidad de polvo y rebote.

Es necesario tener presente que esta clasificación se desarrolló originalmente para shotcrete por vía seca y que se ha extendido su uso a vía húmeda en los últimos 15 años.

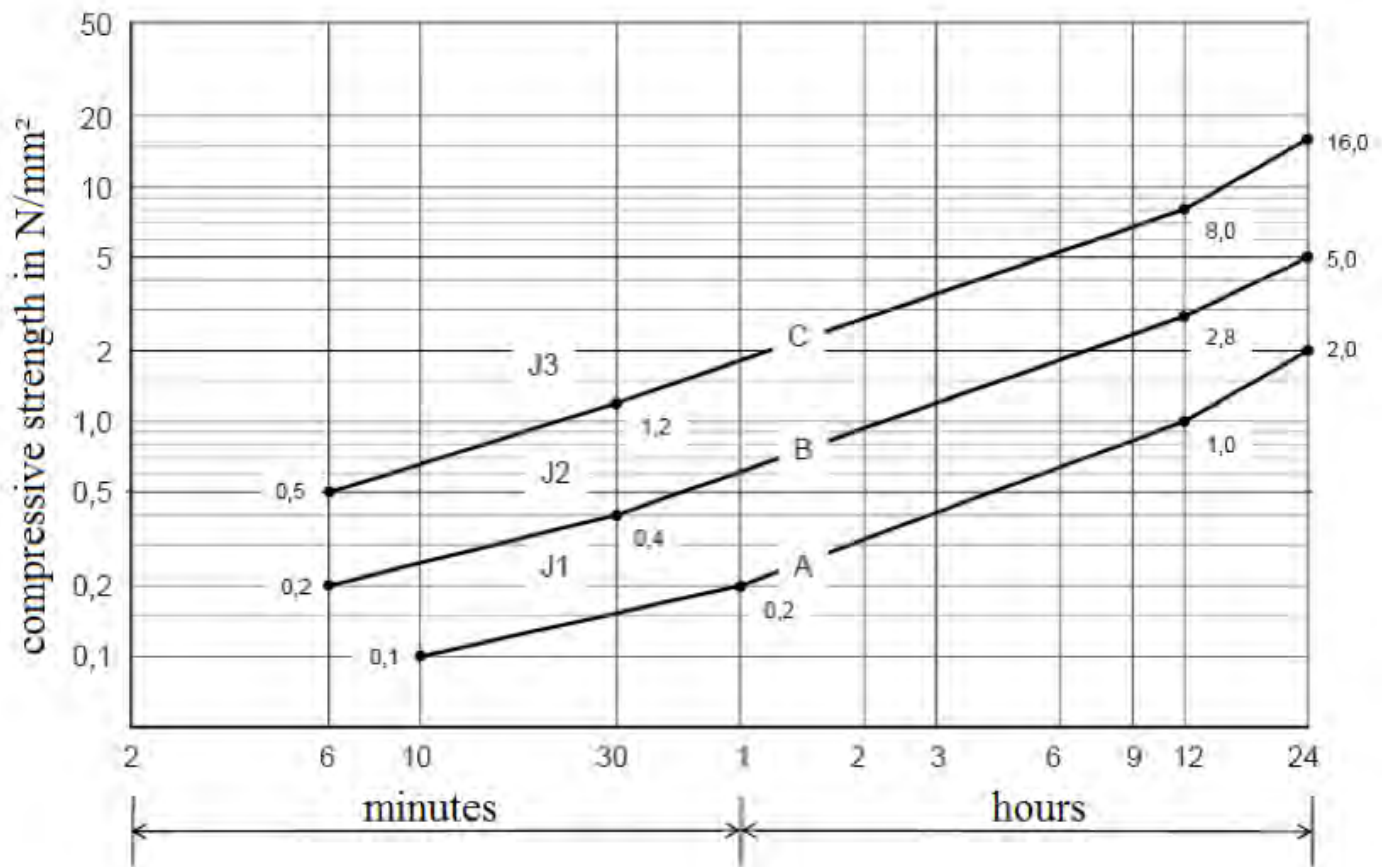


Figura 12.1: Guía Austriaca <sup>42</sup>, corresponde a la figura 7-1. Requisitos de resistencia temprana que debe cumplir el hormigón proyectado fresco. Clase J1: entre A y B, Clases J2: entre B y C, clases J3 sobre C.

# 13

## CAPÍTULO

### Salud y Seguridad

#### 13.1 Generalidades

Como todas las actividades de construcción, la proyección de hormigón debe ser planificada y ejecutada con la debida atención en salud y seguridad de los operadores y el entorno. Para ello lo más recomendable es emplear los servicios de proveedores, empresas y contratistas competentes.

##### > **Diseño y construcción para la seguridad**

Desde la fase de diseño se espera que todas las partes en el contrato tengan en cuenta las implicaciones de seguridad y salud de sus propuestas. A través del plan de seguridad y la evaluación de riesgos en todas las materias que les competen para planificar y crear un entorno de trabajo seguro, donde el riesgo sea eliminado o reducido en gran medida.

##### > **Mantención de un lugar de trabajo seguro**

Después de la debida consideración en la etapa de diseño, el equipo de construcción trabajará para mantener este entorno seguro. El plan de seguridad de la obra debe acompañar la actividad día a día y debe tomar un registro diario y por turno como referencia futura.

##### > **Control de sustancias peligrosas para la salud**

Los componentes del hormigón proyectado contienen cemento y posiblemente otros aditivos y productos químicos. Los fabricantes de materiales y contratistas tienen la obligación de efectuar una evaluación para el manejo y uso de los materiales que presente algún riesgo. En esta evaluación se destaca los peligros que puedan existir y las medidas necesarias para eliminar el riesgo para el usuario. Debe prestarse especial atención a circunstancias especiales, como por ejemplo las áreas recientemente proyectadas, perforadas o detonadas. Todos los materiales deben ser utilizados de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Es esencial para el operador la correcta lectura e interpretación de los pictogramas.

##### > **Entorno de trabajo.**

Se debe crear y mantener un entorno de trabajo seguro. Esto incluye suelo nivelado y el acceso adecuado a la zona de trabajo. Se debe proporcionar una iluminación adecuada y en caso requerido ventilación, especialmente para la extracción de polvo o cuando se trabaja en un

espacio cerrado. Cuando sea necesario también se debe proporcionar protección contra el polvo y las salpicaduras.

El personal de trabajo debe contar, en general con los servicios adecuados. Estos incluyen: alojamiento donde puedan cambiar y secar la ropa, lavandería, servicio de aseo y un área limpia separada para comer y tomar descansos.

##### > **Disposición de residuos.**

Las operaciones de hormigón proyectado suelen generar importantes cantidades de material de desecho. Esto incluye la neblina de la proyección y el rebote de material junto con el embalaje de los materiales y aditivos entregados.

Deben reciclarse o eliminarse los residuos y vertidos sin poner en peligro la salud humana y sin que se use un procedimiento o método que pueda dañar el medioambiente, en especial:

- Poner en peligro el agua, aire, suelo, flora y fauna.
- Provocar ruidos u olores indebidos.
- Afectar negativamente al entorno o el paisaje.

#### 13.2 Equipo de protección personal (EPP)

Todo el personal debe usar un casco de seguridad para protección de la cabeza, calzado de seguridad con punta reforzada homologado, el que de acuerdo al tipo de faena se recomienda sea botas pantaneras y en especial un chaleco o buzo con elementos reflectantes que permitan una alta visibilidad del operador en el frente de trabajo. En países como Australia y Sudáfrica se han desarrollado cremas dermatológicas que actúan como barrera y es recomendable su uso para el operador.

La vestimenta de protección apropiada para el operador (manga larga y pantalón largo, como buzo o de dos piezas) debe mantenerse en buenas condiciones y ser de un material que lo proteja de la actividad que realiza, de preferencia de color amarillo, naranja y con cintas reflectantes (pueden existir otros colores o una combinación de ellos).

Los requisitos de EPP mínimos para un operador en obras subterráneas, adicionalmente a las gafas y el respirador, son

otros elementos como cascos que incluyan una “corriente de aire” en su interior evitando que se empañe además de disponer de filtros de respiración incorporados. Otro elemento indispensable es la lámpara de uso estándar con un cargador de batería adicional o incluido en la lámpara misma. Las siguientes figuras permiten apreciar mejor estos equipos personales.

> **Protección Respiratoria:**

Este tipo de trabajo, por lo general, se realiza después de actividades de tronaduras, pese a que existe un tiempo de espera para ventilar el lugar, se recomienda una barrera adicional de protección usando filtros para prevenir exposiciones a concentraciones de NOx (gases nitrosos), a su vez la solución utilizada en el shotcrete contiene compuestos orgánicos e inorgánicos y también debe asumirse la presencia de material particulado. Por lo que el filtro para este tipo de operación debe ser del tipo GME-P100, con máscara de rostro completo (full-face).

La máscara de rostro completo entregará un mayor factor de protección (50) de acuerdo a la guía de protección respiratoria del Instituto de Salud Pública, a la vez deberá entregar protección facial para los impactos de la operación. Por las condiciones del lugar de trabajo, alta humedad y calor, los trabajadores deberán ocupar líquidos antiempañantes para renovar las capas antiempañantes de los visores de la máscara

Para situaciones de mayor contaminación es recomendable usar equipos de respiración PAPR (equipos de respiración asistidos por un soplador) o línea de aire (máscara de suministro de aire). Ver tabla 13.1 sobre equipamiento recomendado.



Figura 13.1 Operador con equipo de protección. Equipo de protección personal recomendado para el operador/pitonero de hormigón proyectado. No deben faltar las cintas reflectantes en su vestimenta personal.



Dos modelos de casco que incluyen sistema de ventilación auxiliado por un equipo exterior, filtra el aire e impide que se empañe y no afecte la visibilidad.



Figura 13.2 Otras soluciones avanzadas en cascos.

Tabla 13.1 Equipamiento personal recomendado.

	Casco ala completa permite protección permanente del operador en faena por el rebote de las partículas en proyección.
	Protección auditiva incluida en el casco.
	Máscara de tipo "Full Face", recomendada para todo tipo de faenas de shotcrete. Con filtro incluido.
	El operador de biera usar un tipo de guante que permita la manipulación con el joystick y además manipular el hormigón.
	Botas del tipo "pantaneras", muy útiles ya que es frecuente encontrar agua en los túneles civiles.

### 13.3 Aspectos específicos del operador y la faena

El operador/pitonero debe tener los conocimientos suficientes para el trabajo, debe estar certificado y con formación específica del lugar de trabajo, también debe conocer el manual de operaciones del lugar de trabajo, la ubicación del equipo y la documentación de seguridad.

El operador/pitonero debe haber recibido formación con los conocimientos específicos del lugar de trabajo acerca de



todos los materiales que hay que usar, cómo tomar medidas protectoras durante la aplicación y cómo actuar en caso de accidente.

Las fichas de seguridad del material (MSDS-Material Safety Data Sheet) para todos los materiales en uso deben estar disponibles en el proyecto y el personal implicado debe estar familiarizado con su ubicación y contenido, en especial con los riesgos y recomendaciones sobre vestimenta protectora.

Deben comprobarse los pictogramas de etiquetado de los envases (bidones, etc.) en cada entrega y antes de proyectar.

Nunca usar un bidón o recipiente vacío para derrames sin retirar la etiqueta del bidón.



Figura 13.3 Distintivos para la identificación de riesgos según NCh2190.



Figura 13.4 Identificación de riesgos de materiales según NCh1411.

Se debe disponer del equipo de primeros auxilios apropiado y de agua fresca en las proximidades de la operación de proyección.

Ninguna otra persona que no sea el propio operario del equipo podrá estar dentro de la zona de rebote y se debe añadir un margen de seguridad adicional.



Figura 13.5 Señalética anunciando la operación de shotcrete.

El operador/pitonero debe tener mucho cuidado al operar en la zona de rebote y debe utilizar el equipo de seguridad apropiado y debe dejar de proyectar inmediatamente si alguien entra en la zona de exclusión. Figura 13.6

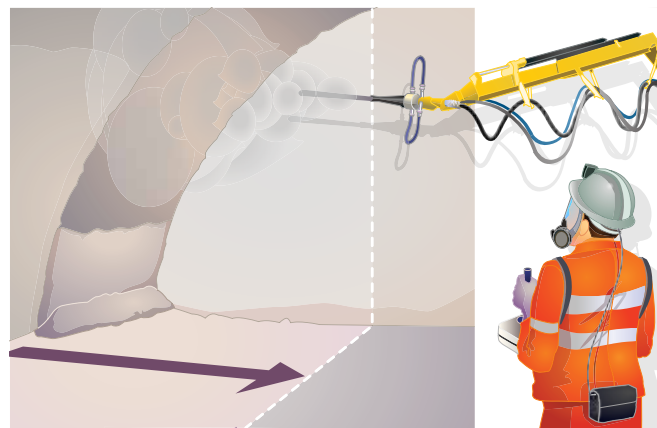


Figura 13.6 Posición del operador durante la proyección. Fuera del área de rebote y con equipo personal adecuado.



Figura 13.7 El operador debe velar que todas las conexiones de la línea de transporte de hormigón estén debidamente cerradas.

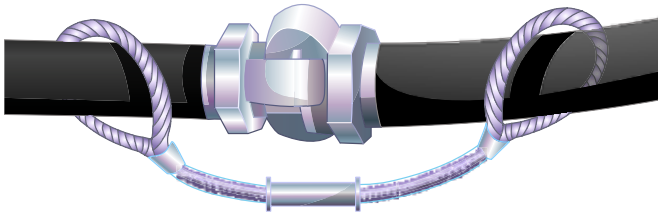


Figura 13.6 Las líneas de combustible y aire, deben llevar en forma adicional una cuerda metálica que permita contener la línea en caso que falle la unión.

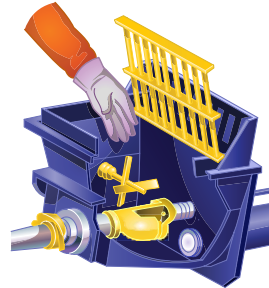


Figura 13.9 Ninguno de los operadores y bajo ninguna circunstancia, cuando ya se disponga para la faena de proyección, debe levantar la rejilla o parrilla de la bomba de hormigón y menos intentar meter la mano o movilizar algún material atrapado en los agitadores o manilla "S".



Figura 13.10 En la recepción del hormigón por parte del operador se debe tener en cuenta que debe estar visible durante las labores de retroceso del equipo, hasta su completa detención y nunca ubicarse entre el capacho y el equipo de transporte.



Figura 13.11 Todas las operaciones de limpieza de los equipos deben ser realizadas con equipos completamente apagados y sin conexión eléctrica.

# 14

## CAPÍTULO

### ACI 506 y la Evaluación del Grado de Testigos

#### 14.1 Generalidades

El código ACI 506.2-95 Especificaciones para Shotcrete, describe los requisitos para los materiales, dosificación y aplicación de hormigón proyectado – shotcrete. Su inclusión en esta Guía se debe a que constantemente se solicita la evaluación de las mezclas y pitoneros en función de este documento.

Hemos optado por su traducción parcial a la que hemos agregado comentarios para contribuir a una correcta interpretación y uso de esta guía ACI.

#### 14.2 Aseguramiento de la calidad

El punto 1.6.1.1 menciona la preparación de paneles de ensayo en la etapa de “preconstrucción” para ser evaluados por el Ingeniero antes de la colocación del hormigón proyectado en la faena. La preparación y ensayo de los paneles debe estar de acuerdo a la norma ASTM C 1140.

El punto 1.6.1.2 indica que los paneles de prueba se deben producir para cada mezcla propuesta, y en cada sentido de proyección u orientación y con cada operador propuesto para el trabajo a desarrollar. En el desarrollo de las pruebas se debe considerar siempre dos tipos de paneles, paneles de prueba sin refuerzos y paneles de prueba con refuerzos del mismo tamaño y espaciamiento requerido para el trabajo. Obtener seis probetas de cada panel, tres muestras no reforzadas y tres con el acero de refuerzo.

El punto 1.6.1.3 indica que la evaluación de los testigos del panel de shotcrete sin refuerzos se evalúa por resistencia a compresión según la norma ASTM C 42.

El punto 1.6.1.4 indica que la evaluación de los testigos del panel de shotcrete con refuerzos se clasifica por “grado del hormigón”, se lleva a cabo por inspección visual de las muestras reforzadas y se evalúa según la Sección 1.7 grados básicos - hormigón proyectado.

El punto 1.6.1.6 establece que a menos que se especifique lo contrario, sólo al pitonero con un panel de prueba con testigos evaluados con un grado menor o igual a 2,5 (según Sección 1.7) se le permitirá proyectar hormigón en el trabajo solicitado. Cuando se rechaza el panel de prueba de precalificación

puede solicitarse una segunda prueba. Cuando la segunda evaluación arroje un promedio superior a 2.5 al pitonero NO se debiera proyectar shotcrete en el proyecto solicitado.

Cabe mencionar que esta opción de evaluar al pitonero puede ser omitida si los operadores son sometidos a un proceso de Certificación, recordemos que el ACI (American Concrete Institute) posee este programa para operadores que realizan shotcrete por vía manual. ACI 506.3R “Guide to Certification of Shotcrete Nozzleman”. Este proceso contempla:

- Examen escrito de 50 preguntas de selección múltiple.
- Proyección en panel horizontal y proyección en panel sobre cabeza.
- El panel posee una distribución de armaduras como se describe en la figura. (Este panel tiene claramente definido el diámetro de las barras y su ubicación. La calificación de los testigos de shotcrete debiera ser realizado considerando esta configuración.

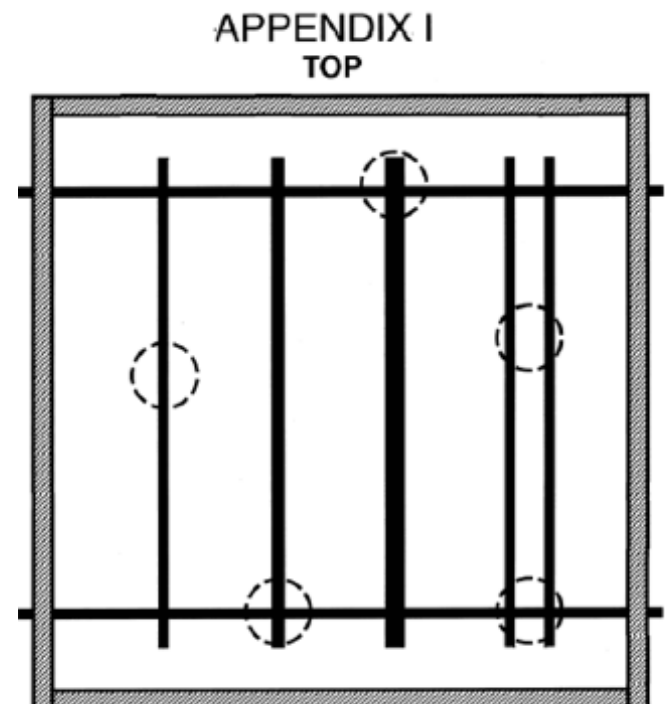


Figura 14.1 Panel para certificación de pitoneros según estándar ACI506.3R para uso del programa de certificaciones del ACI e ICH. Los círculos, identifican el punto donde se debe extraer el testigo para su revisión.



### 14.3 Calificación del Hormigón Proyectado

El punto 1.7.1 define Grado 1: muestras de hormigón proyectado sólido; no hay laminaciones, zonas arenosas o vacías. Las pequeñas burbujas de aire con un diámetro máximo de 1/8 de pulgada (3mm) y la longitud máxima de 1/4 de pulgada (6mm) son normales y aceptables. Bolsas de arena o huecos continuos detrás del acero de refuerzo son inaceptables. La superficie contra el fondo del panel debe estar en buen estado, sin una textura arenosa o huecos.

El punto 1.7.2 define Grado 2: muestras de hormigón proyectado con no más de dos laminaciones o zonas de arena con dimensiones que no excedan de 1/8 de pulgada (3mm) de espesor y de 1 pulgada de largo (25mm). La altura, el ancho y la profundidad de los huecos no deberán exceder de 3/8 de pulgada (10mm) zonas porosas detrás del acero de refuerzo no deben ser superiores a 1/2 pulgada (13mm) en cualquier dirección excepto a lo largo de la longitud del acero de refuerzo. La superficie contra el fondo del panel debe estar en buen estado, sin una textura arenosa o huecos.

El punto 1.7.3 define Grado 3: muestras de hormigón proyectado con no más de dos láminas o zonas de arena con dimensiones superiores a 3/16 de pulgada (5 mm) de espesor por 1-1/4 pulgadas de largo (32mm), o un gran vacío, bolsas de arena, o laminación con arenas mal adheridas que no exceda de 5/8 de pulgada (16mm) de grosor y 1-1/4 pulgadas (32mm) de ancho. La superficie contra el fondo debe ser plano, puede ser arenosa o con huecos que contienen exceso de rebote hasta 1/16 pulg (2mm) de profundidad.

El punto 1.7.4 define Grado 4: El testigo presenta similitud al Grado 3, pero puede tener dos defectos importantes, como se ha descrito para el Grado 3 o puede tener un defecto con una dimensión máxima de 1 pulgada (25 mm) perpendicular a la cara del testigo con un ancho máximo de 1-1/2 pulg (38mm). La superficie de contacto con el molde puede ser arenosa, con vacíos o rebote de hasta 1/8 pulg (3 mm) de profundidad.

El punto 1.7.5 define Grado 5: un testigo que no cumpla con los criterios de los grados básicos 1 a 4, por ser de menor calidad, se clasifica como de grado 5.

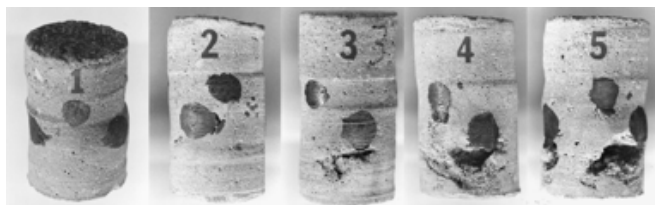


Figura 14.2 ejemplo de la clasificación del Grado del Testigo de Shotcrete en un panel reforzado con armadura.

El punto 1.7.6 establece que la determinación del grado será mediante el cálculo de la media de un mínimo de tres testigos.

Es decir, lo mínimo son tres testigos a ser observados, si se usa la armadura especificada para el proyecto, de lo contrario usando el panel ACI son 5 testigos (ver Figura 14.1). Cada testigo es evaluado en forma individual de acuerdo a lo descrito en los puntos anteriores, el promedio de 3 o de 5, es el grado de la proyección de ese hormigón y de un pitonero en particular.

El punto 1.7.7 clarifica la evaluación final, estableciendo que una calificación media de 2,5 o menos es aceptable a no ser que se especifique lo contrario en el proyecto. Testigos individuales de hormigón proyectado con un grado mayor que 3 son inaceptables.



Figura 14.3 Ejemplo de testigos evaluados mediante la distribución de armaduras para un proceso de certificación de pitoneros bajo estar ACI 506.3R.



# 15

CAPÍTULO

## Referencias y Bibliografía

### 15.1 Referencias

- 1 Yoggy, G. "The History of Shotcrete", Shotcrete, Vol. 2, No. 4, 2000, pp 28-29.
- 2 Terzaghi, K. "Rock defects and loads in tunnel supports" Rock Tunnelling with Steel Supports, R.V. Proctor & T.L. White (eds) The Commercial Shearing and Stamping Co. Youngstown, Ohio, pp 17-99, 1946.
- 3 Barrett, S. & McCreath, D.R. "Shotcrete Support Design in Blocky Ground – Towards a Deterministic Approach" Tunnels and Deep Space, 10(1), pp 79-88, 1995.
- 4 AFTES Recommendation for the Design of Sprayed Concrete in Underground Support, Association Francaise des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 2000.
- 5 ICE Design and Practice Guides: Sprayed Concrete Linings (NATM) for Tunnels in Soft Ground, Institution of Civil Engineers, London, 1996.
- 6 American Concrete Institute Special Publication Number 57, Refractory Concrete, 314pp, ACI Farmington Hills, USA, 1978.
- 7 RILEM TC 162-TDF, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete", Materials & Structures, Vol. 36, Oct 2003, pp560-567.
- 8 John, M. & Mattle, B., "Shotcrete Lining Design: Factors of Influence", RETC Proceedings, pp726-734, 2003.
- 9 Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M., and Corkum, B., "Integration of geotechnical and structural design in tunneling", Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis, 29 Feb 2008, pp1-53.
- 10 British Tunnelling Society, Specification for Tunnelling, Third Edition, pp200, Thomas Telford, London, 2010.
- 11 Windsor, CR "Shotcrete Rock Support in Australian Mines: Curing and Thickness", Surface Support in Mining, Australian Centre for Geomechanics, 2004.
- 12 Grimstad, E. & Barton, N. "Updating the Q System for NMT" in Proceedings of International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes, Norway, pp 21, 1993.
- 13 Bieniawski, Z.T. "Engineering Classification of jointed rock masses" in Transactions of the South African institution of Civil Engineers 15, pp 335-344, 1973.
- 14 Brady, B.H.G. and Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining London. George Allen & Unwin, 1985.
- 15 Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. "Engineering classification of rock masses for design of tunnel support" in Rock Mechanics, 6(4), pp 189-236, 1974.
- 16 Milne, D., Hadjigeorgiou, J. and Pakalnis, R. "Rock Mass Characterization for Underground Hard Rock Mines" Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 4, pp 393-391, 1998.
- 17 ASTM Standard Test Method C-1550, "Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)" ASTM International, USA.
- 18 EN 14488 Testing Sprayed Concrete, European Standard (Euronorm) European Committee for Standardisation.
- 19 Bernard, E.S. "Behaviour of round steel fibre reinforced concrete panels under point loads", Materials and Structures, RILEM, Vol 33, pp 181-188, April 2000.
- 20 Bernard, E.S. "Creep of cracked fibre-reinforced shotcrete panels", Shotcrete: More Engineering Developments, Bernard (ed.), pp 47-58, Taylor & Francis, London, 2004.
- 21 McKay, J. & Trottier, J-F. "Post-crack creep behaviour of steel and synthetic FRC under flexural loading", Shotcrete: More Engineering Developments, Bernard (ed.), pp 183-192, Taylor & Francis, London, 2004.
- 22 Neville, A.M. Properties of Concrete, Longman, London, 2002.
- 23 Beaupre, D., Jolin, M., Pigeon, M., and Lacombe, P. "Recent developments in the field of shotcrete: the Quebec Experience", Shotcrete: Engineering Developments, Balkema, The Netherlands, 2001.

- 24 ACI CT-13, ACI Concrete Terminology, American Concrete Institute, USA.
- 25 Clements, M.J.K, Jenkins, P.A., and Malmgren, L. "Hydroscaling – An overview of a young technology", Shotcrete: More Engineering Developments, Bernard (ed.), pp 89–96, Taylor & Francis, London, 2004.
- 26 Bernard, E.S. "Early-age load resistance of fibre reinforced shotcrete linings", Tunnelling and Underground Space Technology, 23, pp451- 460, 2008.
- 27 ACI 547R Refractory Concrete, American Concrete Institute, USA.
- 28 Gray, J. "Laboratory procedure for comparing pumpability of concrete mixtures", presented at the sixty-fifth annual meeting of the society, National Crushed Stone Assn., Washington, D.C., June 24-29 (1962), pp. 964-971.
- 29 Beaupre, D.. Rheology of High Performance Shotcrete, Civil Engineering Department, University of British Columbia, Canada. Ph.D. Thesis, 250 pages (1994).
- 30 Browne, R.D., Bamforth, P.B. "Tests to Establish Concrete Pumpability", ACI Journal, Vol. 74, No. 5, May, (1977) pp. 193-207.
- 31 Du, L., & Folliard, K. J. "Mechanisms of Air Entrainment in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue 8, August 2005, pages 1463-1471.
- 32 Pigeon, M., Marchand, J., Pleau, R. "Frost Resistant Concrete". Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp. 339-348 (1996).
- 33 Dyer, R. M. "An Investigation of Concrete Pumping Pressure and the Effects of Pressure on the Air-Void System of Concrete", Masters Thesis, University of Washington, 223 pages (1991).
- 34 Jolin, M., & Beaupre, D. "Temporary high initial air content wet process". Shotcrete, Vol. 2, No. 1, pp. 32-34 2000.
- 35 Jolin, M., Burns, D., Bissonnette, B, Gagnon, F and Bolduc, L-S. "Understanding the pumpability of concrete", Shotcrete for Underground Support XI, Davos, Switzerland, June 8-10, 2009.
- 36 ACI 506.2\_95 Specification for Shotcrete, American Concrete Institute, USA.
- 37 DBV 2001 Design Principles of Steel Fibre Reinforced Concrete for Tunnelling Works, Deutscher Beton-Verein.
- 38 Sprayed Concrete Guidline, April 2013, Austrian Society for Construction Technology.

40 ACI 318.11- Código de Diseño de Hormigón Armado (S), American Concrete Institute, USA edición ICH.

41 Manual del Hormigón de SIKA, Edición marzo del 2010.

### 15.1.1 Otras bibliografías recomendadas

- Barrett, S. & McCreath, D.R. "Shotcrete Support Design in Blocky Ground – Towards a Deterministic Approach" Tunnels and Deep Space, 10(1), pp 79–88, 1995.
- Bernard, E.S., and Geltinger, C. "Determination of Early-Age Compressive Strength for Shotcrete", Shotcrete Vol. 9, No, 4, 2007, pp 22–27.
- Bernard, E.S., "Design performance requirements for fiber-reinforced shotcrete using ASTM C-1550", Shotcrete: More Engineering Developments, Bernard (ed.), pp 67–80, Taylor & Francis, London, 2004.
- Bernard, E.S. "Correlations in the behavior of fiber reinforced shotcrete beam and panel specimens" Materials and Structures, RILEM, Vol 35, pp 156–164, April 2002.

## 15.2 Bibliografía

### 15.2.1 Normas y Guías Internacionales

- ACI CT-13 ACI Concrete Terminology, American Concrete Institute, USA.
- ACI 201.2R- Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 506R Guide to Shotcrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 547R Refractory Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 506.1R-08 "Guide to fiber Reinforced Shotcrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 506.4R-94 "Guide for the Evaluation of Shotcrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 5R-09 "Guide for Specifying Underground Shotcrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 547R Refractory Concrete, American Concrete Institute, USA.
- ACI 318.11- Código de Diseño de Hormigón Armado (S), American Concrete Institute, USA edición ICH.
- DBV 2001 Design Principles of Steel Fibre Reinforced Concrete for Tunnelling Works, Deutscher Beton-Verein.

- DIN 1048-5 (1991) Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould), DIN.
- AS/NZS-ISO9001 Quality Management Systems, Standards Australia.
- AASHTO Test Method TP60, "Standard Specifications for Transportation and Methods of Sampling and Testing" AASHTO, Washington, 2006.
- ASTM Standard Test method C-78 "Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-point Loading)", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-116, "Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Guide C-295, "Petrographic Examination of Aggregates for Concrete", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-531, "Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-642 "Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-666, "Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-672, "Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Practice C-1140, "Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-1550, "Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)", ASTM International, USA.
- ASTM Standard Test method C-1609, "Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-point Loading)", ASTM International, USA.
- ASTM C172 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete)", ASTM International, USA.
- ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete)", ASTM International, USA.
- ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
- ASTM C231 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
- ASTM C1064 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete.
- AS1012 Methods of testing concrete, Standards Australia.
- AS1141 Methods of sampling and testing aggregates, Standards Australia.
- AS1379 Specification and supply of concrete, Standards Australia.
- AS1478 Chemical admixtures for concrete, mortar and grout, Standards Australia.
- AS2758 Aggregates and rock for engineering purposes, Standards Australia.
- AS2783 Use of reinforced concrete for small swimming pools, Standards Australia.
- AS3582 Supplementary cementitious materials for use with Portland and blended cement, Standards Australia.
- AS3600 Concrete structures, Standards Australia.
- AS3735 Concrete structures retaining liquids, Standards Australia.
- AS3799 Liquid membrane-forming curing compounds for concrete, Standards Australia.
- AS3972 Portland and blended cements, Standards Australia.
- EN 14488 Testing Sprayed Concrete, European Standard (Euronorm) European Committee for Standardisation.
- EN 206-1 Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad (Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity).
- EN 12350 Ensayos de hormigón fresco.
- EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete, European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry (EFNARC) 1996.
- Swedish Standard SS 137243 Concrete testing-Hardened concrete, shotcrete and plaster-Adhesion strength (in Swedish) 1987.

### 15.2.2 Normas Chilenas

- NCh148 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.
- NCh152 Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado.
- NCh163 Áridos para Morteros y Hormigones - Requisitos Generales.
- NCh165 Aridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.
- NCh170 Hormigón - Requisitos generales.
- NCh171 Hormigón - Extracción de muestras de hormigón.
- NCh413 Agua para fines industriales - Ensayos - Determinación del pH.
- NCh1017 Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.
- NCh1018 Hormigón - Preparación de mezclas de prueba en laboratorio.
- NCh1019 Hormigón - Determinación de la ductilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.
- NCh1037 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- NCh1328 Áridos para Morteros y Hormigones - Determinación de la desintegración - Método de los Sulfatos.
- NCh1441 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de sales – Parte 1: Determinación de cloruros y sulfatos
- NCh1498 Hormigón - Agua de amasado - Requisitos generales.
- NCh1564 Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco.
- NCh2182 Hormigón y mortero - Aditivos – Clasificación y Requisitos.
- NCh 2183 Hormigón y mortero - Método de ensayo - Determinación del tiempo de fraguado.
- NCh2184 Hormigón y mortero - Método de ensayo - Determinación del contenido de aire.

- NCh2262 Hormigón y mortero - Método de ensayo - Determinación de la impermeabilidad del agua – Método de la penetración de agua bajo presión.
- NCh-2190 Transporte de sustancias peligrosas y sus pictogramas.
- NCh-1411 Prevención de Riesgos.

### 15.2.3 Links de Interés

- ICH: [www.ich.cl](http://www.ich.cl)
- ICH: [www.shotcrete.cl](http://www.shotcrete.cl)
- ACI: [www.concrete.org](http://www.concrete.org)
- ASTM: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASA: [www.shotcrete.org](http://www.shotcrete.org)
- Standards Australia: [www.standard.org.au](http://www.standard.org.au)
- EFNARC: [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)
- OBV: [www.bautechnik.pro](http://www.bautechnik.pro)





## Pruebas de Compatibilidad de Materiales Constituyentes del Shotcrete

Este anexo presenta una forma estandarizada en Europa para la realización de pruebas de laboratorio de las combinaciones de Cemento/Aditivo Acelerante, con especial atención a los tiempos de fraguado.

Los métodos de prueba utilizados para evaluar el tiempo de fraguado se basan en el principio de las pruebas de penetración con aguja de Vicat. El método se describe más adelante, básicamente sirve para poner a prueba y evaluar la idoneidad del cemento en combinación con un aditivo acelerante.

El informe del ensayo debe contener como mínimo: el método elegido, los materiales, las dosis utilizadas, el tiempo de fraguado inicial y final.

El método de la aguja de Vicat consiste en establecer el tiempo de fraguado de la combinación cemento/acelerante. En una proporción o razón a/c dado, el comienzo y el final de la prueba se establecen para una combinación cemento/acelerador dado. El aparato debe estar libre de vibraciones cuando sea utilizado y en una superficie horizontal.

### Instrucciones para la prueba

- a.- Temperatura del lugar de trabajo (laboratorio)  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Temperatura del cemento y agua:  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , en casos especiales,  $8^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- b.- Preparar 250 g de cemento y agua. Los valores de razón a/c podrán tener combinaciones desde 0,35 a 0,45. En peso.
- c.- Añadir el acelerante líquido al agua, normalmente a una cantidad equivalente 3 - 5% del peso del cemento (o la cantidad que recomiende el fabricante). El contenido de humedad del acelerante se cuenta en la cantidad de agua añadida.
- d.- Tomar una taza de goma y mezclar enérgicamente ambos componentes por un periodo de 15 segundos con una espátula.
- e.- Vaciar en un molde de goma (de Vicat  $h = 40$  mm,  $dui = 65$  mm,  $doi = 74$  mm) y enrasar con la espátula. Retirar el anillo de goma. Estas operaciones tienen que ser completadas dentro de los 25 segundos después de la

adición inicial del agua. Si la pasta resultante no es fácil de manipular, pruebe con una dosis menor.

- f Use el aparato de Vicat para determinar el comienzo y el final de fraguado. El fraguado inicial se define como el tiempo cuando la aguja se queda pegada en la pasta de 3 a 5 mm por encima de la placa (placa de vidrio o plástico); el tiempo de fraguado final se define como el tiempo cuando la aguja penetra en no más de 1 mm en la pasta. Cálculo de los tiempos se cuenta desde la primera adición de agua.

Para realizar más de una inserción de la aguja, estas deben estar separadas al menos 5mm entre ellas mientras se realiza la prueba.

La siguiente es una forma alternativa de preparar la pasta de cemento de referencia.

Preparar la pasta de cemento mezclando en un recipiente adecuado,  $300 \pm 15$  g de cemento de referencia con  $105 \pm 5$  g de agua para formar una pasta homogénea. Agregar a esta pasta la cantidad de aditivo especificada por el proveedor, mezclar rápida y completamente y colocar en el molde del aparato Vicat. El mezclado y llenado del molde deben efectuarse entre 15 – 30 segundos, sin producir segregación o vibración.





## Ejemplo de Plan de Inspección y Calidad sugerido para Túneles Mineros

El siguiente es una propuesta de un estándar de calidad para control, evaluación y seguimiento, en las etapas de pre-construcción y construcción.

La etapa de construcción puede estar sujeta a cambios de exigencia y frecuencia en la medida que los ensayos respalden propuestas del contratista o en su defecto exigencias del mandante por el desempeño del proyecto.

### Etapa de PRE-CONSTRUCCIÓN

Variable	Detalle del requerimiento	Observaciones
Dosificación del aditivo	Calibración bomba de aditivo. Establecer la relación entre el caudal del acelerante y el indicador de la bomba de aditivo.	Calibración inicial de bomba de hormigón, inyección de aditivo y cantidades. Se repite cada vez que hay cambios de dosificación del hormigón y/o de alguno de los componentes del hormigón proyectado.
	Determinación de la cantidad de aditivo (% y masa por metro cubico de hormigón proyectado). Debe quedar registrado de manera visible en la cabina del equipo de proyección. Debidamente marcado en la consola de control del operador del equipo.	
Calibración bomba de hormigón	Determinar el rendimiento de la bomba de hormigón de acuerdo a manual del equipo.  Se verificará el caudal después de cada mantenimiento a los componentes de la bomba o cada 600 horas de uso del equipo e informar.	
Certificación del personal	Para los operadores de equipos robotizados deberán presentar la certificación de EFNARC vigente antes del inicio de las faenas del proyecto. Las nuevas contrataciones durante el proyecto deberán participar de cursos de capacitación conducente a dicha certificación.  Para operadores que realicen operaciones de shotcrete manual, deberán presentar certificación bajo norma ACI.	El examinador deberá estar acreditado EFNARC con certificado vigente.  Quienes no aprueben el examen, antes o durante la ejecución tendrán 2 meses para volver a rendir su examen y completar su Certificación.
Docilidad del Hormigón	El hormigón proyectado, para obtener una buena fluidez y bomeabilidad , deberá tener entre 18 a 22cm medido con cono de abrams en terreno, según NCh1019.	Se deberán presentar ensayos de "tiempo abierto de la mezcla" cuando se utilicen inhibidores de fraguado u otros aditivos para extender el uso de la mezcla para eventuales retrasos de la entrega hormigón si estos serán más allá de 1.5 hrs.
Resistencia a edades tempranas (Hasta 24 Horas)	De acuerdo a lo establecido en la guía austriaca (vigente) "Austrian Sprayed Concrete Guidelines" se deberá establecer la curva de madurez y el control por medio de Curvas J.  En panel de la medición deberá tener de fondo al menos 100mm para su proyección con los costados abiertos en 45° para no almacenar rebote. Las mediciones no se deberán realizar con un espesor menor a 100mm. Los operadores del laboratorio y el laboratorio deberán presentar procedimiento demostrable de la correcta medición y registro de los resultados. (Ante la ausencia de Norma se recomienda acreditar el procedimiento con ICH).	Se debe verificar la evolución las resistencias tempranas, para lo cual se realizará una medición en dos paneles gemelos a edad de 6, 10, 30, 60, 90 min; 12 y 24 hr. Informe debe presentar resultados y gráfico correspondiente. La medición deberá quedar en J2 o superior según requisitos de Ingeniería o calidad del sustrato.

Variable	Detalle del requerimiento	Observaciones
Resistencia a la compresión	Resistencia del Shotcrete de acuerdo a diseño.	Se extraerán 5 testigos de paneles (Dimensión 600x600x200mm; con paredes del panel abiertas en 45° para evitar recibir el rebote), los testigos deben ser ensayados con esbeltez 1 tratados según NCh1171. Las Edades de los ensayos son: 1 a 7 días, 1 a 14 días y 3 a 28 días. Estos resultados deben ser comparados con ensayos en panel nulo sin acelerante, para lo cual el promedio de los testigos a 28 días no podrá ser menor al 85% de la $f'c$ y ningún testigo individual menor al 75% $f'c$ .  Considerar la realización de ensayos sobre y bajo cabeza.
Ensayo de absorción de energía	Los valores de energía absorbida que deberán cumplir las dosificaciones serán:  Categoría de Sostenimiento Energía (EFNARC) (Joule) - CS1 a CS3 >700 - CS4 a CS6 >1000	Se debe evaluar la absorción de energía del hormigón proyectado con fibra mediante el ensayo de Absorción propuesto por EFNARC en 2 paneles a 28 días.  Es viable presentar los resultado según ASTM C1550 si el contratista presenta memoria de cálculo de equivalencia en los resultados realizados con la misma mezcla y condiciones de proyección comparados con panel EFNARC.
Contenido de fibra	Ensayo de contenido de fibra metálica o fibra plástica bajo norma UNE-EN 14488-7 contenido solo en estado fresco de la mezcla.	Los resultados que se deberán presentar deben corresponder al mismo día y hora de la proyección de shotcrete con el cual se llenaron los paneles para ensayo EFNARC o ASTM C1550.

## Etapa de CONSTRUCCIÓN

Variable	Detalle del requerimiento	Observaciones
Dosificación del aditivo	Se deberá verificar la dosificación y caudal cada 500mts de avance e informar y corregir en el panel de control del operador y tabla al interior de la cabina del equipo.	Considerar la presentación de los informes asociados a estas actividades en la emisión del informe de calidad.
Calibración y mantención equipo de proyección	Se deberá verificar el caudal de hormigón después de cada mantención realizada a los componentes de la bomba (considerar frecuencia de mantención cada 600 horas de uso del equipo).	
Docilidad y temperatura del hormigón	El hormigón proyectado, para tener una buena fluidez y bombeabilidad, deberá tener entre 18 a 22cm medido con cono de abrams en terreno, según Nch1019, vigente. Se deberá controlar la Temperatura del hormigón en el lugar de la proyección según norma ASTM C1064.	Estos controles al menos una vez al día se deberán registrar en la guía de despacho del hormigón solicitado. Considerar además estos controles durante las adiciones o correcciones de la mezcla tanto en espera o descarga del hormigón.
Docilidad del hormigón	El hormigón proyectado, para obtener una buena fluidez y bombeabilidad, deberá tener entre 18-22cm medido con cono de abrams en terreno, según Nch 1019.	Se deberán presentar ensayos de "tiempo abierto de la mezcla" cuando se utilicen inhibidores de fraguado u otros aditivos para extender el uso de la mezcla para eventuales retrasos de la entrega hormigón si estos serán más allá de 1.5 hrs.
Resistencia a edades tempranas (Hasta 24 Horas)	De acuerdo a lo establecido en guía austriaca (vigente) "Austrian Sprayed Concrete Guidelines" se deberá establecer la curva de madurez y el control por medio de Curvas J.  En panel de la medición deberá tener de fondo al menos 100mm para su proyección con los costados abiertos en 45° para no almacenar rebote. Las mediciones no se deberán realizar con un espesor menor a 100mm.	Se debe verificar la evolución las resistencias tempranas, para lo cual se realizará una medición en dos paneles gemelos a edad de 6, 10, 30, 60, 90 min; 12 y 24 hr. Informe debe presentar resultados y gráfico correspondiente.  Las mediciones se deberán realizar cada 200m, e informar resultados y gráfico correspondiente.
	El informe de Resistencia temprana deberá informar a qué edad el hormigón alcanza 1.0, 1.5 y 2.0 Mpa.	Este informe se recomienda considera e informar a la frente para reingresar con un trabajo seguro a juicio del geomecánico o profesional. Se pueden solicitar otros ensayos complementarios, (adherencia roca-shotcrete y shotcrete – shotcrete).



Variable	Detalle del requerimiento	Observaciones
Resistencia a la compresión	Resistencia del shotcrete de acuerdo a diseño.	<p>Se extraerán 3 testigos de paneles (Dimensión 600x600x200mm; con paredes del panel abiertas en 45° para evitar recibir el rebote), los testigos deben ser ensayados con esbeltez 1 tratados según NCh1171 vigente.</p> <p>Las Edades de los ensayos son: 1 a 7 días y 2 a 28días Frecuencia de ensayo cada 60 metros lineales de desarrollo por frente de trabajo. Intercalado con la extracción de los testigos in-situ.</p>
	Resistencia del shotcrete en galería.	<p>Extracción de 3 testigos.</p> <p>El promedio de los testigos a 28días no podrá ser menor al 85% de <math>f'c</math> y ningún testigo individual menor al 75% <math>f'c</math>.</p> <p>Frecuencia de ensayo cada 30 metros lineales de desarrollo por frente de trabajo. Intercalado con los ensayos de paneles.</p>
Ensayo de absorción de energía	<p>Los valores de energía absorbida que deberán cumplir las dosificaciones serán:</p> <p>Categoría de Sostenimiento Energía (EFNARC) (Joule)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CS1 a CS3 &gt;700</li> <li>- CS4 a CS6 &gt;1000</li> </ul>	<p>Se recomienda evaluar la absorción de energía del hormigón proyectado con fibra mediante el ensayo de Absorción propuesto por EFNARC en 2 paneles a 28días.</p> <p>Es viable presentar los resultado según ASTM C1550 si el contratista presenta memoria de cálculo de equivalencia en los resultados realizados con la misma mezcla y condiciones de proyección comparados con panel EFNARC Cada 400 M2 (cada 100m de avance).</p>
Contenido de fibra	Ensayo de contenido de fibra metálica o fibra plástica bajo norma UNE-EN 14488-7, contenido solo en estado fresco de la mezcla.	<p>Los resultados que se deberán presentar deben corresponder al mismo día y hora de la proyección de shotcrete con el cual se llenaron los paneles para ensayo EFNARC o ASTM C1550.</p> <p>Cada 200M2 (cada 50m de avance). Es válido coincidir las muestras con toma de muestras del panel.</p>
Control espesor final.	Medición del espesor según la Norma UNE-EN 14488 – 6.	<p>Se deben perforar por lo menos cinco agujeros espaciados <math>600 \pm 50</math> mm, en dos líneas de tres en ángulo recto. Se debe informar el lugar y punto, el espesor mínimo, máximo y promedio siempre en mm.</p> <p>Se realizaran cada 10m de avance en puntos aleatoriamente definidos al momento de la inspección. Al cabo de 30mt se deben tener registro de las medianas en caja izquierda, caja derecha y sobre cabeza. El contratista podrá optar a otro mecanismo de medición si entrega seguridad y eficiencia.</p>
Control de adherencia	Criterios de aceptación: 0,5 MPa shotcrete/roca. 1,0 MPa shotcrete/shotcrete. Considerar ensayos para roca tipo: 1, 2, 3 shotcrete/roca y para roca tipo: 4 y 5 tomar adherencia solo shotcrete/shotcrete.	Frecuencia de ensayo cada 200 metros lineales de desarrollo por frente de trabajo.
Rebote / Rechazo del shotcrete	Medición en masa de acuerdo a la última calibración de la bomba de hormigón y aditivo. Validada previo a la medición. Rango del 6-10% en masa.	<p>El rechazo se debe medir por turno y por operador, cada 500 mt de avance.</p> <p>Consultar Guía de Hormigón Proyectado ICH.</p>



**Gentileza de:**



