

Crterios relevantes para el Uso y Diseño de Sostenimiento de Túneles mediante NATM



Ing. Martin Böfer
GEOCONSULT BUENOS AIRES S.A.



TEMAS TRATADOS

- A. Evolución del Hormigón Proyectado**

- B. Uso actual**

- C. Tipo y características de hormigón proyectado (fresco y endurecido)**

- D. Requerimientos y Controles**

- E. Aplicación, equipos, métodos y procedimientos**

A

Evolución del Hormigón Proyectado

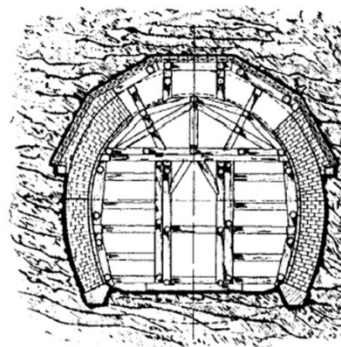
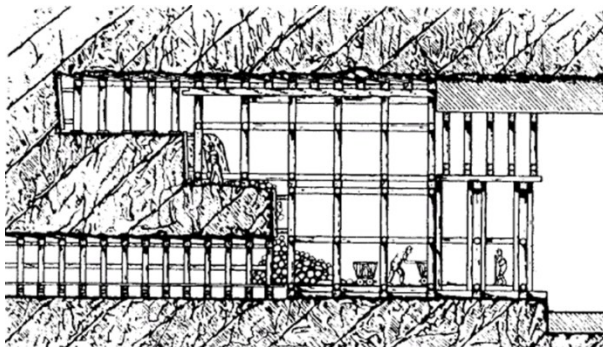
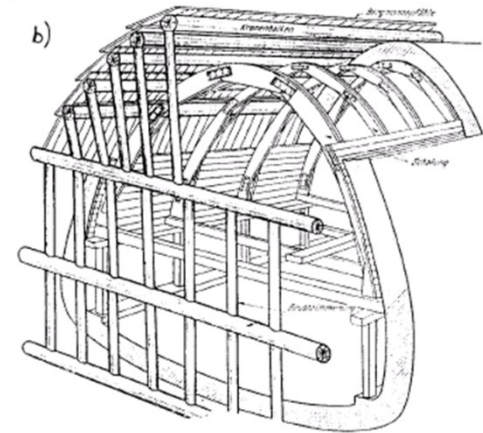
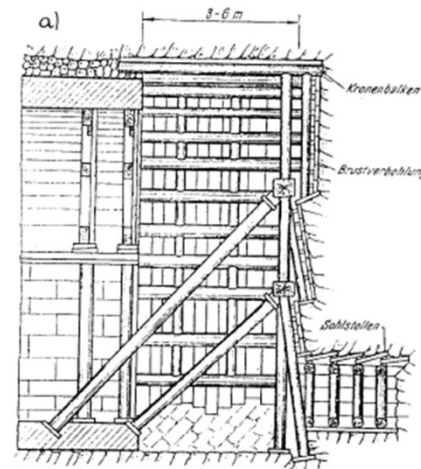
- El hormigón proyectado comenzó a emplearse en forma creciente y sistemática después de la 2ª guerra mundial.
- En particular, la existencia del hormigón proyectado, junto con el uso de pernos de acero, dio origen al “NATM” = New Austrian Tunnelling Method, término empleado por primera vez por el profesor austríaco Rabcewicz en 1964



A

Evolución del Hormigón Proyectado

- Gracias a la existencia del Hormigón Proyectado y los pernos pudieron abandonarse los métodos clásicos empleados hasta ese momento, con los que era inevitable una fuerte relajación del macizo rocoso / subsuelo.



- La inmediata resistencia del hormigón, combinada con la ductilidad de los pernos, permitió generar un sistema compuesto que otorga un confinamiento progresivo, activando la función portante del macizo

A

Evolución del Hormigón Proyectado



- Inicialmente, revestimientos de hormigón proyectado sólo tenían una función temporal, limitada al período de construcción de túneles

- El revestimiento definitivo, en general era de hormigón colado in-situ, bien de características impermeables o no, instalándose en general, una membrana impermeable entre ambos revestimientos.



A

Evolución del Hormigón Proyectado

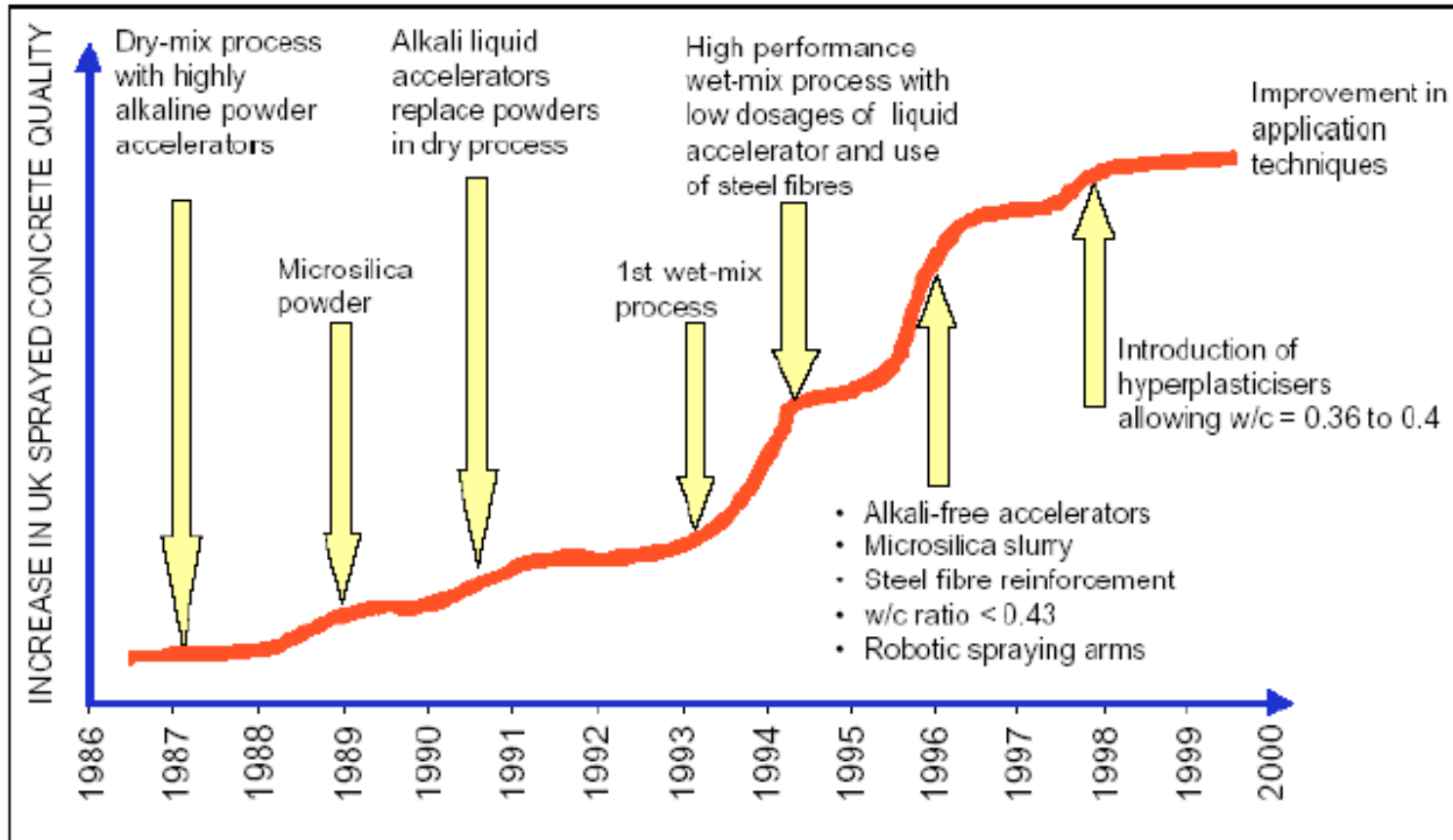


Gráfico Ilustrativo de la Evolución del HP en los últimos Años

A

Evolución del Hormigón Proyectado

- La evolución de la calidad del HP básicamente tiene relación con la existencia de nuevos aditivos, tales como microsílíce, acelerantes libres de álcalis y superplastificantes.
- Pudiéndose garantizar un producto de calidad mucho más alta, por ende, también de suficiente durabilidad y de suficiente uniformidad, resultó razonable, emplear revestimientos de HP permanentes.
- Se comenzó a usar el revestimiento primario como cáscara de función permanente, aplicando sobre ella un revestimiento secundario, también de HP .
- Inicialmente, los revestimientos compuestos de HP se emplearon prioritariamente en sectores atípicos (intersecciones, túneles con forma variable, etc.), por los elevados costos de encofrados (Metro Jubilee and Heathrow, Londres)

A

Evolución del Hormigón Proyectado

- Junto con la posibilidad de construcción de cáscaras compuestas más económicas, apareció la necesidad de garantizar la durabilidad y de lograr impermeabilidad.



- Ello hizo más y más relevante la necesidad de empleo de fibras, pues a través de la eliminación de armaduras (barras o mallas soldadas), se reduce el riesgo de ocurrencia de nidos (oquedades).
- Además del empleo más específico y planificado de los aditivos (microsílice, superplastificantes, fibras, etc.), se desarrollaron membranas proyectables impermeables.

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Uso clásico – Revestimiento primario temporal de túneles

- En condiciones de trabajo en que la instalación del revestimiento primario es dificultosa, el macizo ejerce grandes presiones (deformaciones), hay fuerte ingreso de agua o se deben instalar marchiavantis o paraguas, que cortan la cáscara, no es recomendable hacer un revestimiento primario permanente.



- En general, en la minería, en aquellos túneles y cavernas, que son de uso limitado en el tiempo.

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Uso clásico – Sostenimiento de Taludes con HP temporal

- En suelo, como paredes apernadas – (soil nailing) - Ej: piques c/paredes verticales en obras de acceso a estaciones de Metro o para sótanos y fundaciones de edificios de altura.



- En roca, junto con pernos, para sostenimiento de cuñas - Ej: Taludes en portales de todo tipo de túneles o en carreteras.

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Uso actual – Revestimientos compuestos permanentes de túneles

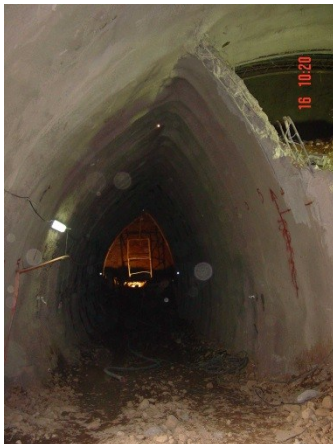
- Especialmente apropiado en condiciones de suelo favorables (suelo competente) y túneles de baja tapada (túneles urbanos), con pocas deformaciones. Ej.: Metros de Santiago y de Buenos Aires (suelos muy rígidos rígidos, sin napa o drenaje de ésta).



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago (a partir del 2002)

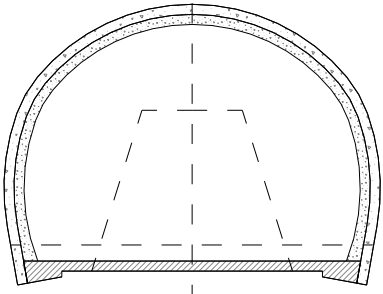
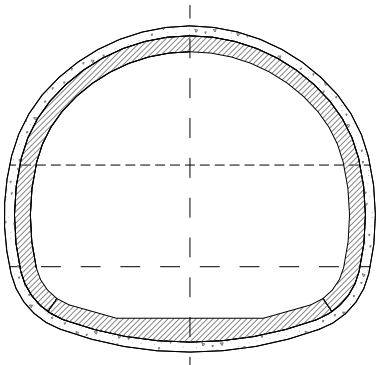
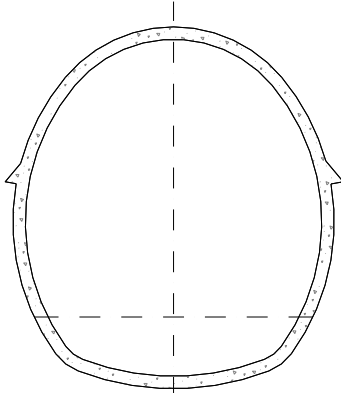
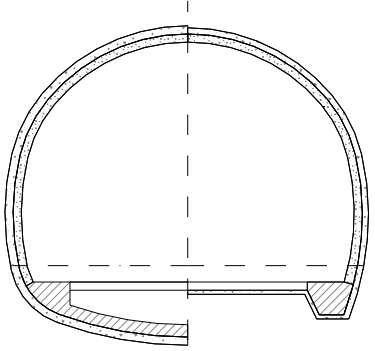


Túnel de Andenes Estación 150 m²

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago

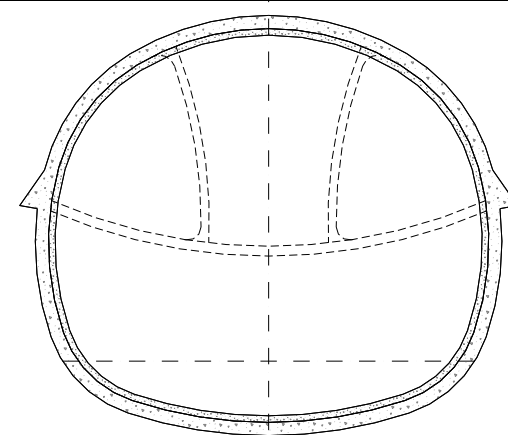
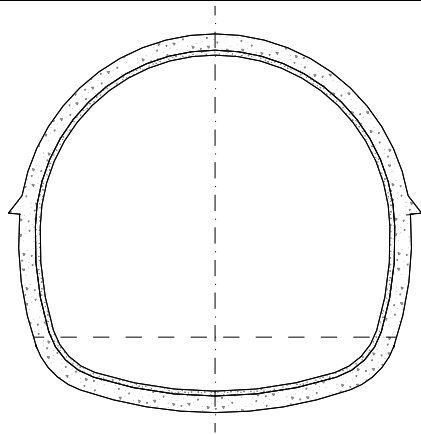
Túneles Interestación			
			
<p>1° túnel Línea 5 $A = 54 \text{ m}^2$</p>	<p>Túnel Extensión al Centro Línea 5 $A = 63 \text{ m}^2$</p>	<p>Túnel de acceso para construcción $A = 54 \text{ m}^2$</p>	<p>Túneles Nuevas Extensiones L5 & L2 $A =$ $57 / 50 \text{ m}^2$</p>

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago

Túneles de Estación



Túnel de Acceso Estaciones Ext. Poniente Línea 5; A =
116 m²

Túnel de Acceso Estaciones Extensiones Norte y Sur
Línea 2; A = 150 m²

Frente de excavación completo

2 frentes de excavación - superior e inferior

En general con contrabóveda

Revestimiento compuesto de Hormigón Proyectado

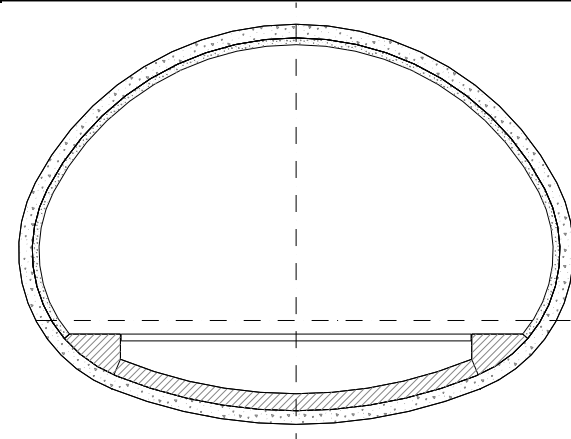
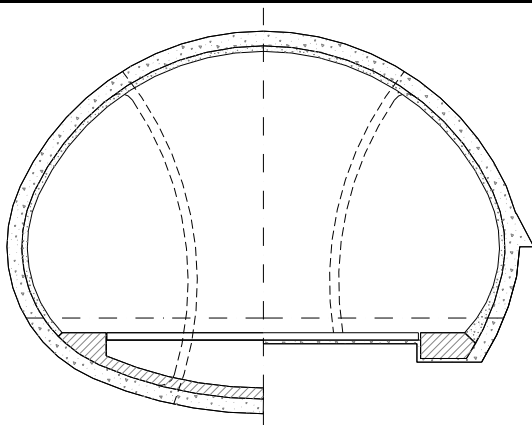
Sistema de Impermeabilización con membrana proyectable entre ambas aplicaciones de shotcrete

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago

Túneles de Estación



Túnel Andenes Estaciones Intermedias

$A = 114 / 100 \text{ m}^2$

Túnel Andenes Estaciones Terminales

$A = 151 \text{ m}^2$

Revestimiento compuesto de Hormigón Proyectado

Excavación subdividida con galerías laterales

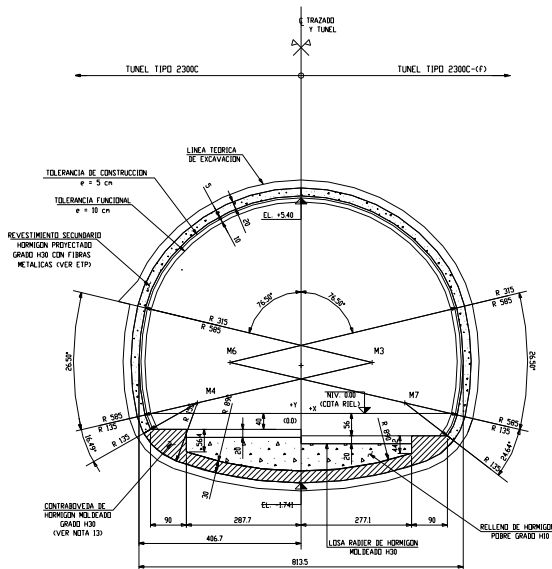
En general con contrabóveda, excepto para estación intermedia en sectores lejanos de intersecciones

Sistema de Impermeabilización a través de membrana proyectable entre ambas aplicaciones de shotcrete

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago



○ Criterios de diseño

- Reducción de espesores ($e_{tot} = 35 - 40$ cm) a través del empleo de revestimiento compuesto de Hº Pº; con ello se logran economías de 20-40% de la obra
- Necesidad de logro de revestimiento primario de buena calidad
- Empleo de revestimiento secundario reforzado con fibras – mayor grado de impermeabilidad

B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en el Metro de Santiago

- Junto con la posibilidad de construcción de cáscaras compuestas más económicas, apareció la necesidad de garantizar la durabilidad y de lograr impermeabilidad.
- Ejemplo: Revestimiento secundario de HP aplicado sobre el primario en forma directa, previo tratamientos (hidrolavado, instalación de medidas de impermeabilización o de captación y evacuación de aguas de infiltración)

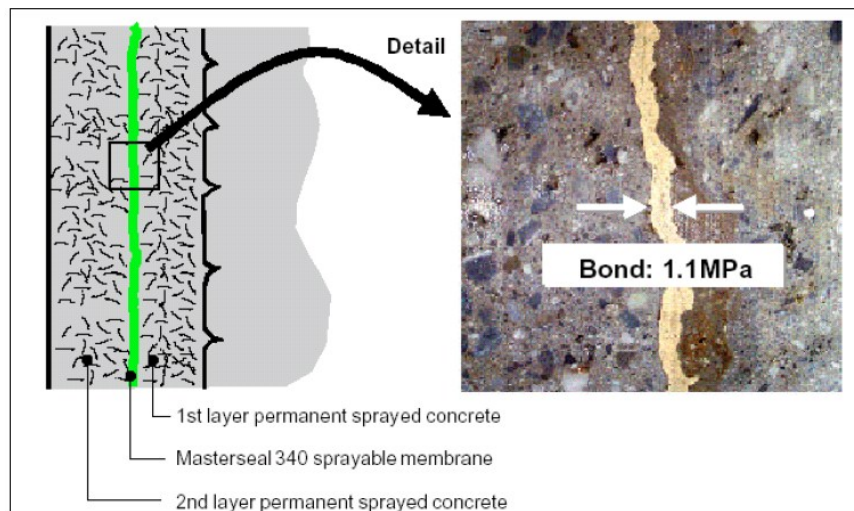


B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimientos compuestos permanentes de HP en Túneles Viales Proyecto La Pólvara (Chile)

- En sectores de elevadas infiltraciones, además de medidas de captación y evacuación de aguas de infiltración mediante medias cañas y fajas de geotextil, se instaló una membrana proyectable (Masterseal F340 de MBT)



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

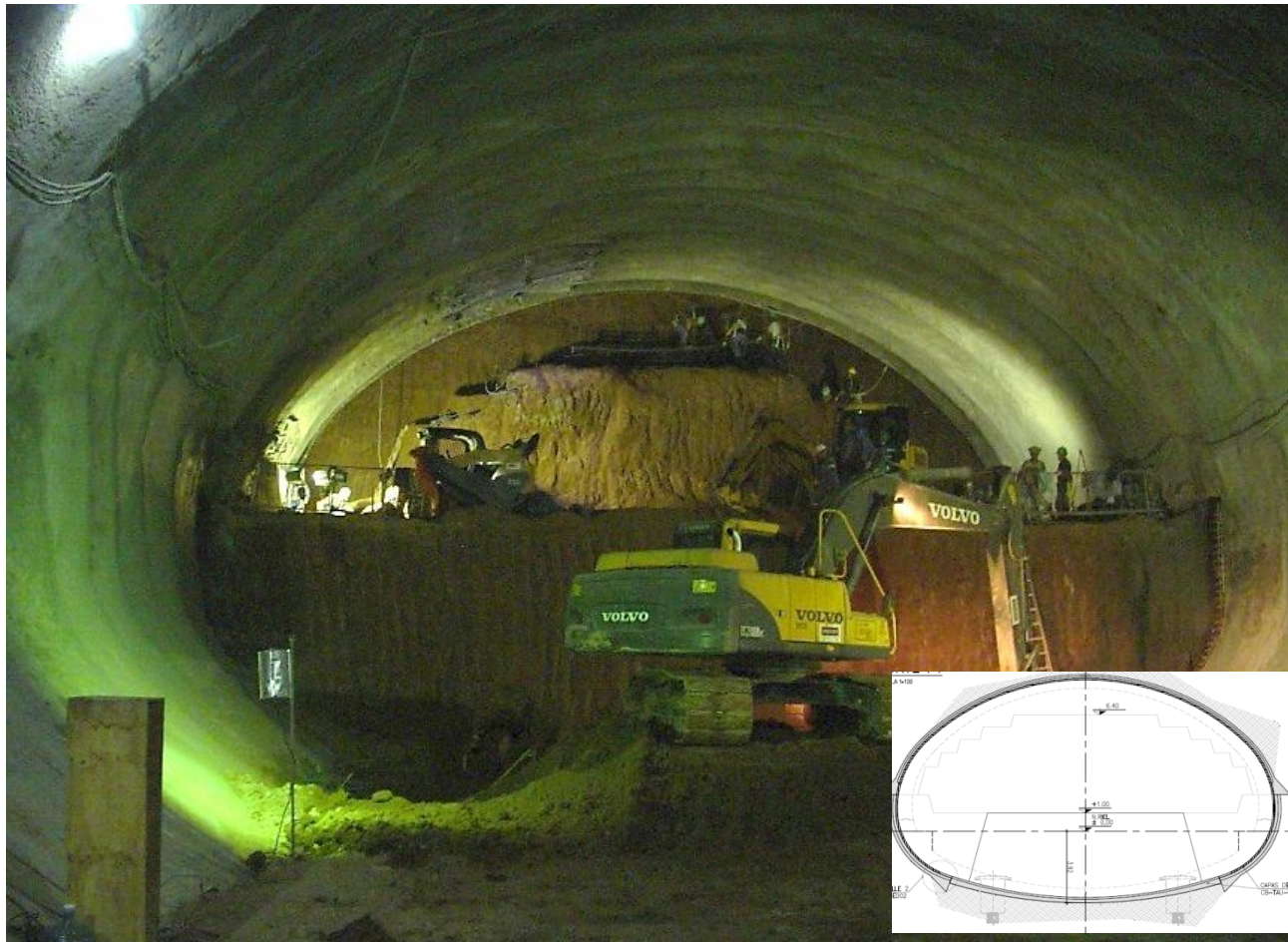
Revestimiento Compuesto de HP – Línea “B” Metro de Bs. As. – Caverna Cochera Villa Urquiza



B

Uso del Hormigón Projectado - Ejemplos

Revestimiento Compuesto de HP – Línea “B” Metro de Bs. As. – Caverna Cochera Villa Urquiza



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Compuesto de HP – Línea “B” Metro de Bs. As. – Caverna Cochera Villa Urquiza



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

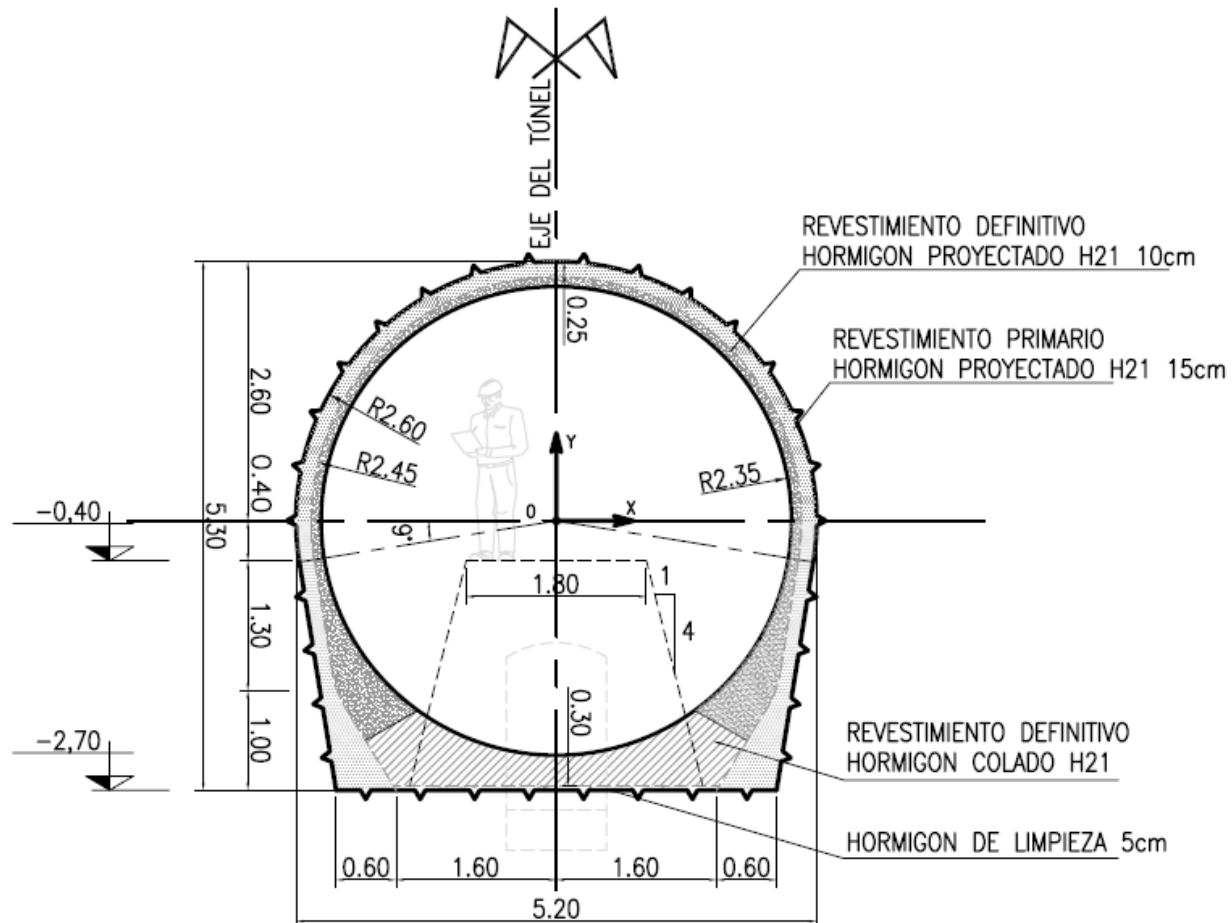
Revestimiento Compuesto de HP – Línea “B” Metro de Bs. As. – Caverna Cochera Villa Urquiza



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Compuesto de HP – Túnel Aliviador Ludueña – Rosario, Prov. de Santa Fe



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Compuesto de HP – Túnel Aliviador Ludueña – Rosario, Prov. de Santa Fe



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

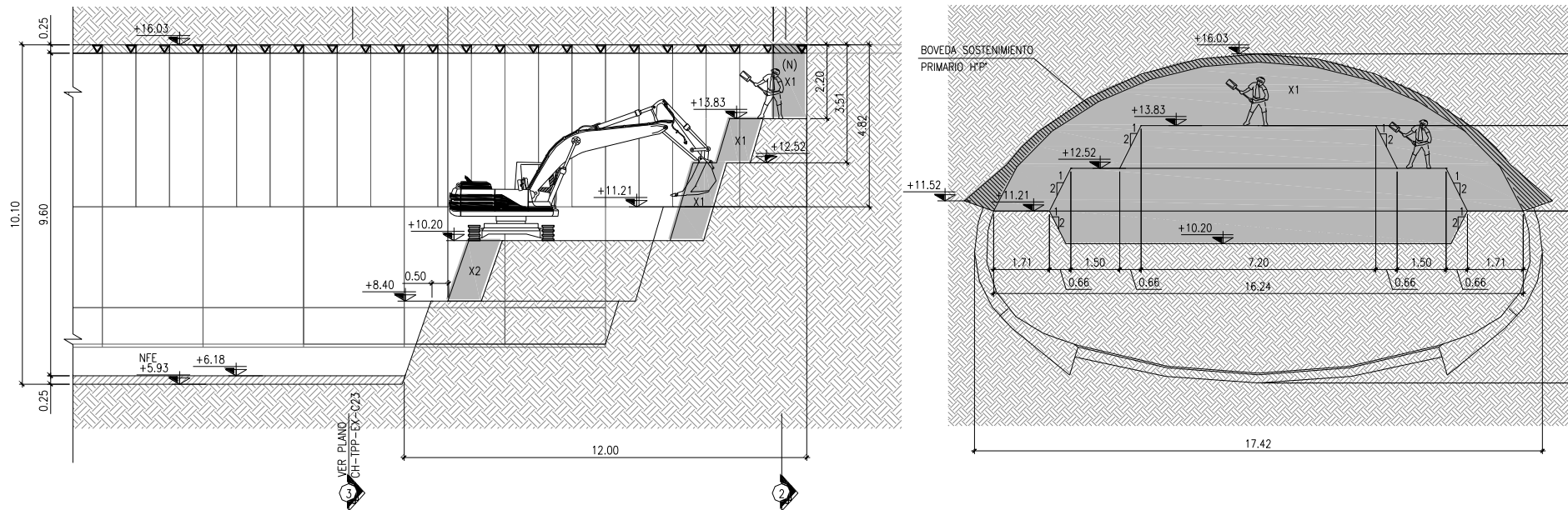
Revestimiento Compuesto de HP – Túnel Aliviador Ludueña – Rosario, Prov. de Santa Fe



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Primario de HP – Línea “H” Metro de Bs. As. - Taller Parque Patricios



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Primario de HP – Línea “H” Metro de Bs. As. - Taller Parque Patricios



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Primario de HP – Línea “H” Metro de Bs. As. - Taller Parque Patricios



B

Uso del Hormigón Proyectado - Ejemplos

Revestimiento Compuesto de HP – Línea “H” Metro de Bs. As. – Muñón Las Heras



C

Características del Hormigón Proyectado

Definiciones terminológicas

- El HP es una mezcla de cemento, agregados de tamaño de grano entre 4 y 12 mm, agua y aditivos, transportado al sitio de instalación mediante transporte neumático mediante manguera, en dónde es compactado a través de una proyección a elevada presión y velocidad.
- HP joven, es HP de < de 24 hs de edad
- Métodos de aplicación de HP:
 - **Vía seca:** la mezcla seca se transporta hasta la boquilla mediante presión, en dónde se adiciona el agua a presión, con incorporación de aditivo acelerante. Con máquinas manuales como la de la figura, se puede proyectar entre 3-15 m³/h



C

Características del Hormigón Proyectado

Definiciones terminológicas

- **Vía húmeda:** la mezcla de cemento, agregados, agua y aditivos plastificantes se bombea a través de una manguera hacia la boquilla, en la que se adiciona aire comprimido con aditivo acelerante líquido; se emplean máquinas manuales o robotizadas; con robots se pueden alcanzar rendimientos de hasta 30 m³/h
- **Vía semi-húmeda:** término que se emplea para la incorporación del agua a la mezcla seca, dentro de la manguera, a pocos metros de la boquilla



C

Características del Hormigón Proyectado

Factores relevantes en diseño de HP de alta calidad (vía húmeda) (1)

- Desarrollo de una mezcla bien gradada, que permita óptimas condiciones de bombeabilidad, trabajabilidad, reducción de rebote y buena compactación;
- Contenido adecuado de material cementicio ($400-500 \text{ kg/m}^3$); el contenido de cemento (excluyendo fillers puzolánicos o de otra índole) no debería ser inferior a 350 kg/m^3 ;
- Relación $A/C < 0,45$, lo que se logra mediante aditivos reductores de agua; actualmente con hiperplastificantes de última generación se logran relaciones A/C de $0,35-0,40$, manteniendo un cono de aprox. 20 cm;
- Es conveniente emplear material puzolánico, tal como microsílica o cenizas volantes;
- Uso controlado de acelerantes de fraguado, para no castigar la resistencia final; AF necesarios para desarrollar adherencia, resistencia temprana y reducción de rebote.

C

Características del Hormigón Proyectado

Factores relevantes en diseño de HP de alta calidad (vía húmeda) (2)

- Es recomendable emplear un refuerzo de fibras, en particular en revestimientos de alta durabilidad, a efectos de reducir las microfisuras por debajo de los 0,2 mm; se pueden emplear fibras de acero o de polypropileno de alta densidad (HDPP);
- Por razones prácticas, cuando se emplea la mezcla húmeda, es conveniente emplear aditivos de control de la hidratación, mediante los que se inhibe el fraguado (hasta por 72 horas), para luego activar la hidratación mediante el aditivo acelerante; El empleo de estos aditivos mejora adicionalmente la calidad del HP, porque previene pre-hidrataciones indeseadas;
- Incorporación de aditivos de curado, adicionados en planta, los que incrementan la adherencia entre capas y el substrato y que reducen al mismo tiempo la permeabilidad;

C

Características del Hormigón Proyectado

Durabilidad de Revestimientos de Hormigón Proyectado

- En general, en estructuras de hormigón, la falta de durabilidad se relaciona con la corrosión de las armaduras, es decir, se debe a la falta de impermeabilidad;
- Por este motivo, es fundamental lograr una buena compactación del hormigón a través de la proyección; además, es importante evitar todo lo posible la existencia de elementos que puedan producir oquedades o falta de compactación y homogeneidad (armaduras, marcos de acero, juntas, etc.);
- Sin la existencia de equipos de buen rendimiento, suficiente capacidad y potencia, como sin incorporación de aditivos especiales, es imposible lograr la impermeabilidad deseada;
- Más allá de materiales y medios apropiados, el logro del objetivo deseado en término de calidad y durabilidad depende del factor humano, los que deberán ser tenidos en cuenta en el diseño y en la emisión de ET.

C

Características del Hormigón Proyectado

Factores a ser considerados en el logro de un revestimientos de HP de calidad

FACTORES HUMANOS

- Chequeo independiente del diseño
- Revisión del diseño durante la construcción
- Implementación de planes de aseguramiento y control de calidad
- Evaluación de riesgos
- Aseguramiento de la calificación del Proyectista

- Monitoreo, revisión e implementación durante la construcción
- Aseguramiento y Control de calidad
- Evaluación de riesgos
- Calificación de personal de obra
- Supervisión de obra
- Entrenamiento del personal

EQUIPO DE DISEÑO

Comunicación

EQUIPO DE CONSTRUCCION

FACTORES ESTRUCTURALES

- Secuencia de construcción
- Detalles de juntas y capas
- Exposición química y física
- Vida útil y propósitos
- Parám. de diseño y efectos del tiempo
- Armaduras o fibras
- Métodos de impermeabilización
- Propiedades de materiales
- Geometría de las secciones

- Diseño de mezcla
- Elección del tipo de aditivo acelerante
- Estudio de los métodos de instalación del HP
- Elección de equipamiento y capacidad
- Métodos de curado
- Métodos de mejoramiento del terreno

C

Características del Hormigón Proyectado

Aditivos Acelerantes de Fraguado – Generalidades (1)

- Sin el empleo de aditivos acelerantes de fraguado, no sería posible el empleo del hormigón en forma proyectada;
- Existen aditivos acelerantes tradicionales (silicatos, silicatos modificados y aluminatos), y los actualmente empleados aditivos “libres de álcalis”;
- Los aditivos tradicionales no posibilitan la producción de un revestimiento de alta calidad (porosidad, mala compactación) y producen una fuerte reducción de la resistencia final (mala calidad del material endurecido, baja densidad, alta porosidad);
- Mediante aditivos acelerantes “libres de álcalis”, se logra una evolución de la resistencia apropiada, sin los efectos negativos citados;
- Cuando se requieren resistencias tempranas muy elevadas o cuando existe fuerte ingreso de agua, se recomienda el uso de aluminatos; el HP resultante, no es apto para revestimientos permanentes (caídas de resistencia de hasta 50%, PH muy elevado >13 = muy agresivo para piel)

C

Características del Hormigón Proyectado

Aditivos Acelerantes de Fraguado – Aluminatos y Silcatos (2)

- Aditivos acelerantes basados en silicatos modificados, son más lentos que los aluminatos, con menos reducción sobre resistencia (30%), con mucho menor contenido de álcalis y por ello menos agresividad ($\text{PH} < 11.5$); su efecto no es “acelerar” el fragüe, sino ejercer un efecto de “adhesión” entre mezcla y agua; no deben ser usados en altos porcentajes, pues generan una calidad deficiente y una falsa sensación de seguridad;
- Básicamente por razones de salubridad, hoy día en general no se permite el uso de aditivos acelerantes tradicionales con álcalis; En particular, si se pretende ejecutar revestimientos permanentes de HP, no deberían emplearse;
- Con el empleo de la vía húmeda y los aditivos acelerantes libres de álcalis, se mejora substancialmente la calidad del aire durante la proyección;
- Se consideran libres de álcalis, los acelerantes que contienen menos de 1% de cationes de álcalis (K^+ , Na^+ , Li^+);

C

Características del Hormigón Proyectado

Aditivos Acelerantes de Fraguado libres de álcalis (3)

- A través de la limitación de cationes álcalis, se reduce el riesgo de las reacciones álcalis – minerales sensitivos de agregados, que pueden generar fracturamiento de los granos debidos a la expansión, con el consiguiente efecto negativo sobre la matriz del HP;
- Se busca hoy día tener acelerantes “neutros”, es decir, que no sean ni cáusticos (básicos) ni ácidos, sino que tengan un PH lo más cercano posible a 0;
- Junto con la reducción de la agresividad a las personas, se limita significativamente el daño al medio ambiente, especialmente al agua subterránea;
- Con estos productos, la reducción de la resistencia final del hormigón puede mantenerse dentro de límites aceptables, variando según el contenido, entre 10 y 25%;
- Frente a los aluminatos, el incremento de la resistencia en las primeras 2 horas es más lento; después, se hace más rápido.

C

Características del Hormigón Proyectado

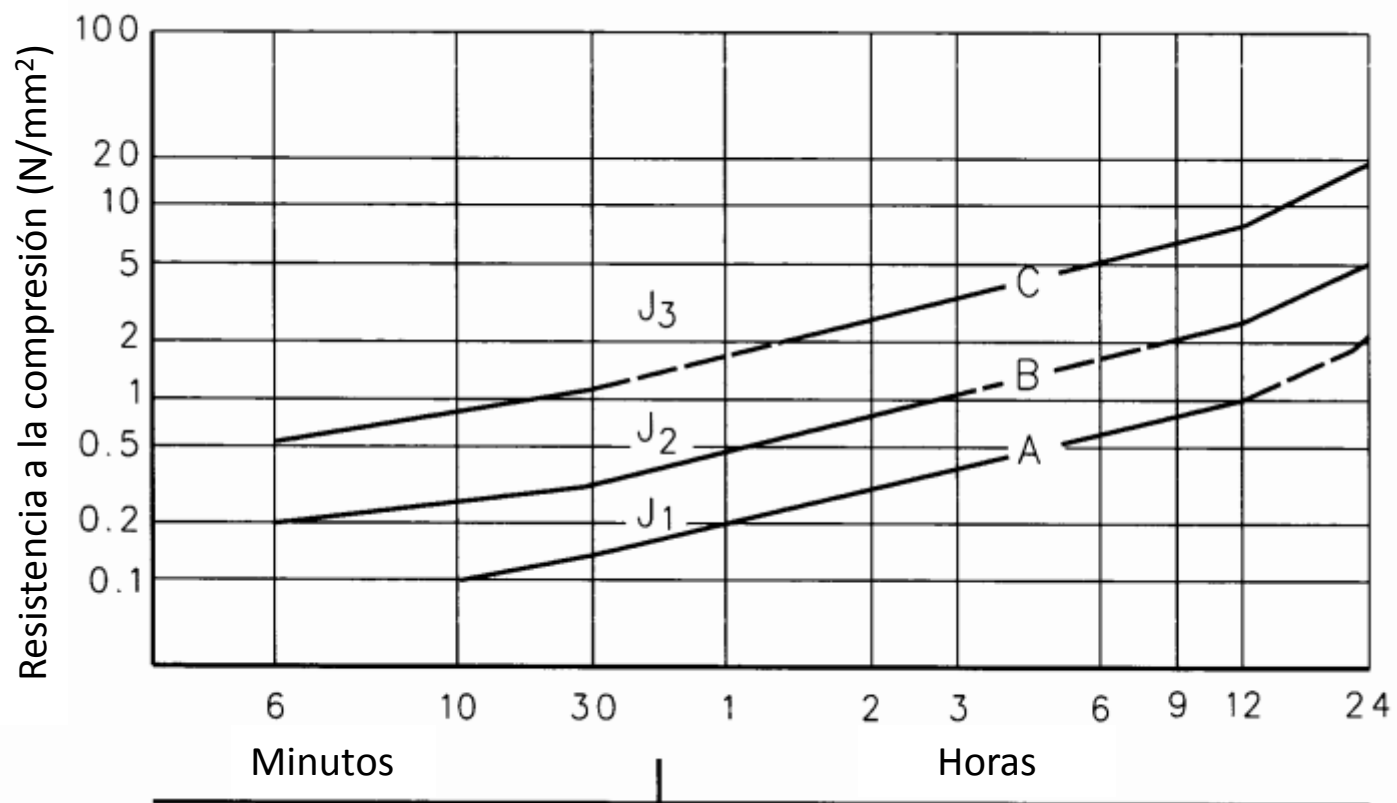
Requerimientos según norma Austríaca (Richtlinie Spritzbeton 2004)

- El hormigón proyectado se divide en 3 tipos: I, II y III, según su aplicación y función estructural, a saber:
 - **Tipo I:** hormigón proyectado sin funciones estructurales (relleno de cavidades, sello, terminación superficial, etc).
 - **Tipo II:** tiene funciones de sostenimiento y fortificación, como por ejemplo, revestimientos de cavidades, sostenimiento del frente de excavación de un túnel, soporte de taludes o de zanjas, etc.
 - **Tipo III:** HP con la misma función estructural que se le asigna a un hormigón colado estructural, es decir, para revestimientos permanentes de túneles, paredes de estanques, reparación de estructuras, etc.
- Hormigones proyectados del tipo II y III deben ser clasificados en función de la evolución de resistencia temprana, en 3 tipos: J1, J2 y J3, tal como ilustrado en el gráfico anterior.
- Para el HP tipo III, es necesario implementar medidas especiales para lograr una textura densa, uniforme y homogénea; deben emplearse aditivos acelerantes libres de álcalis c/dosis reducidas, tamaños de grano $D \leq 11\text{mm}$; no debe proyectarse directamente sobre superficies con ingreso de agua.

C

Características del Hormigón Proyectado

Evolución de la Resistencia – Clasificación según norma Austríaca
Análisis de Aptitud de Mezclas mediante Ensayos



C

Características del Hormigón Proyectado

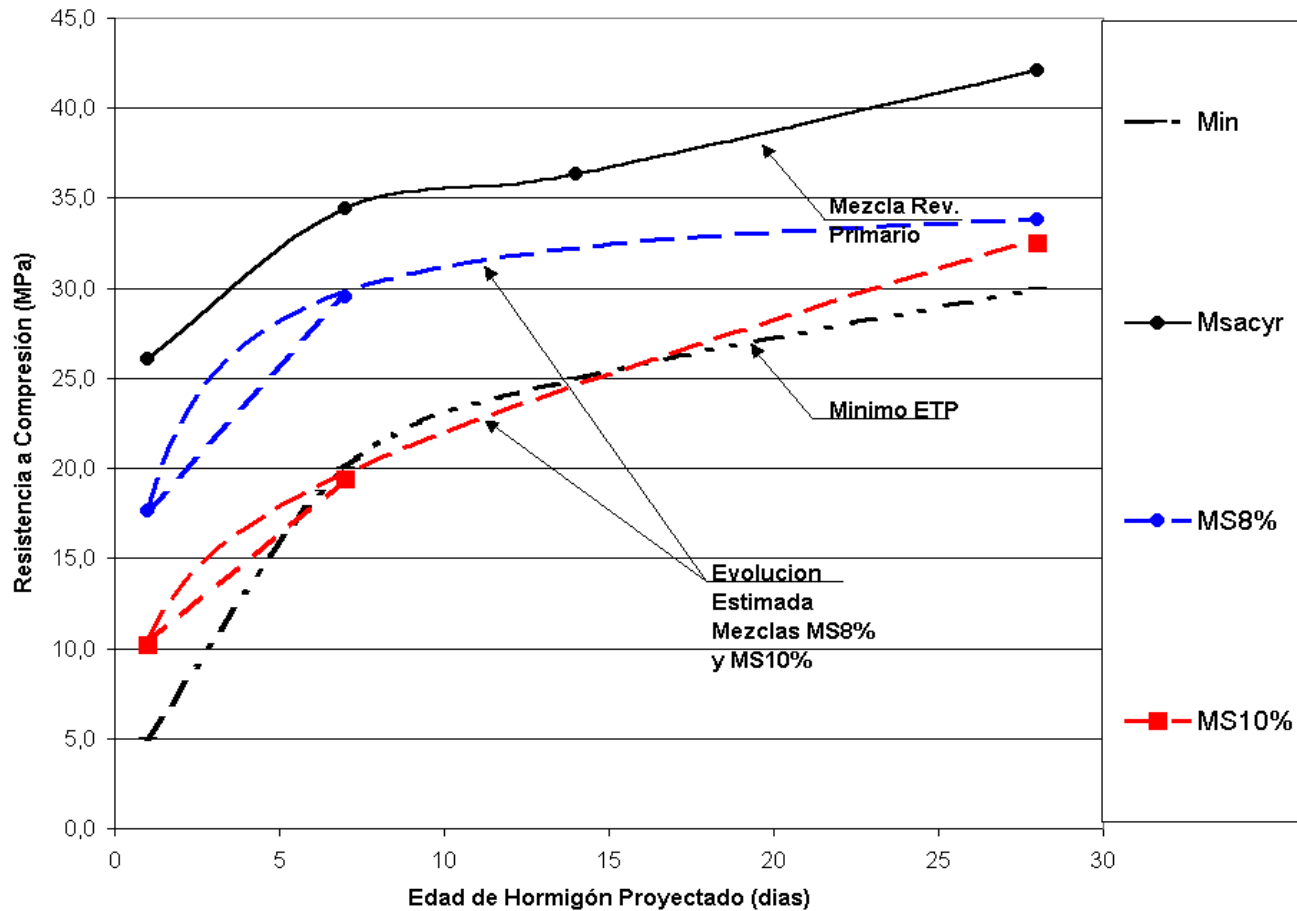
Significado de las clases de endurecimiento J1, J2 y J3

- Durante los primeros pocos minutos, la evolución de la resistencia no sólo afecta la aptitud del HP para ser proyectado sobre cabeza, sino también, la generación de polvo y de rebote. A los 2 min la resistencia debe estar entre 0,1 y 0,2 N/mm²
- Si la resistencia se desarrolla muy rápido, el HP se endurece inmediatamente al entrar en contacto con el substrato, previniendo que granos más gruesos proyectados después se inserten en la matriz, con la consiguiente mala compactación; se producirá también rebote alto y más polvo. (Resistencia a compresión ≥ 2 min., no debe ser mayor a 0,2 N/mm²)
- Tipo J1: apropiado para proyección en capas delgadas sobre una base seca, sin requerimientos de resistencia en las primeras horas; baja producción de polvo;
- Tipo J2: HP que debe resistir cargas en forma inmediata y que debe poder ser instalado sobre cabeza en capas de espesor considerable;
- Tipo J3: HP sólo para ser empleado en condiciones particulares: suelo o roca muy inestable, alto ingreso de agua, etc.

C

Características del Hormigón Proyectado

Evolución típica de la resistencia después de las 24 horas (Ej. Metro Santiago)



D

Requerimientos y Controles para el Hormigón Proyectado

Requerimientos de Aptitud - Laboratorio

- **Ensayos de aptitud en laboratorio: diseño de dosificación (mezcla)**
 - **Selección de la vía de proyección apropiada (seca, húmeda, semihúmeda)**
 - **Selección de cemento y aditivos fluidificantes y acelerantes - compatibilidad**
 - **Verificación de las condiciones de fraguado – valores típicos requeridos**

inicio fraguado	1 - 3 minutos
resistencia temprana	1 – 4 Mpa en 1 – 3 hs. (adherencia, capas sucesivas)
evolución resistencia	min 5 Mpa a las 8 – 12 hs min 10 Mpa al día
 - **Verificación de la resistencia final y de la caída máxima de resistencia (25 % frente a hormigón nulo)**

D

Requerimientos y Controles para el Hormigón Proyectado

Requerimientos de Aptitud – Implementos y Equipos en Obra

- **Ensayos de aptitud en obra: verificación equipos proyección – proyección sobre paneles de prueba**



- Verificación aptitud de equipos (compresor, bomba dosificadora, shotcretera, etc.)
- Verificación de la homogeneidad de la mezcla lograda en obra (trabajabilidad, compactación, adherencia)
- Ejecución de ensayos sobre paneles:



- Resistencia temprana – hasta 2 hs. – penetrómetro (aguja 3 y 9 mm)
- Resistencia entre 2 – 12 hs. – arrancamiento de pernos HILTI
- Resistencia a 12 hs, 24 hs y 28 días – extracción de probetas cilíndricas

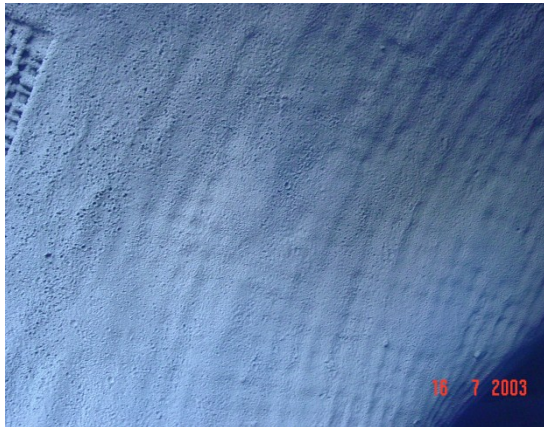
D

Requerimientos y Controles para el Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Control de Calidad en Obra

- Verificación de la calidad del hormigón proyectado instalado en obra

Absorción [%]	Densidad Seca [kg/m ³]	Volumen de vacíos [%]
6,62	2104	14
Max. 8 %	2275	Max. 17
OK	No (92,5%)	OK



Requerimientos y Controles para el Hormigón Proyectado

D

Hormigón Proyectado – Control de Calidad en Obra

- **Verificación de la impermeabilidad**
 - **Verificación que la penetración de agua a 7 atmósferas no exceda un valor máximo de 50 mm**
 - **Verificación que la penetración de agua a 7 atmósferas no exceda un valor medio de 20 mm**

- **Verificación de la adherencia**
 - **La resistencia media a la tracción medida en un testigo no debe ser menor a 1 Mpa**
 - **La resistencia individual de cualquier medición no debe ser inferior al 70% de la media**

D

Requerimientos y Controles para el Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Aptitud del Personal

○ **Ensayos de aptitud de pitoneros – debe exigirse por contrato**



- **Proyección sobre paneles con disposición de cerchas y armadura similares a los empleados en túnel**
 - **Verificación de la técnica de proyección del pitonero**
-
- **Verificación de la calidad de revestimiento lograda (extracción de testigos, corte de la muestra por aserrado, etc.)**

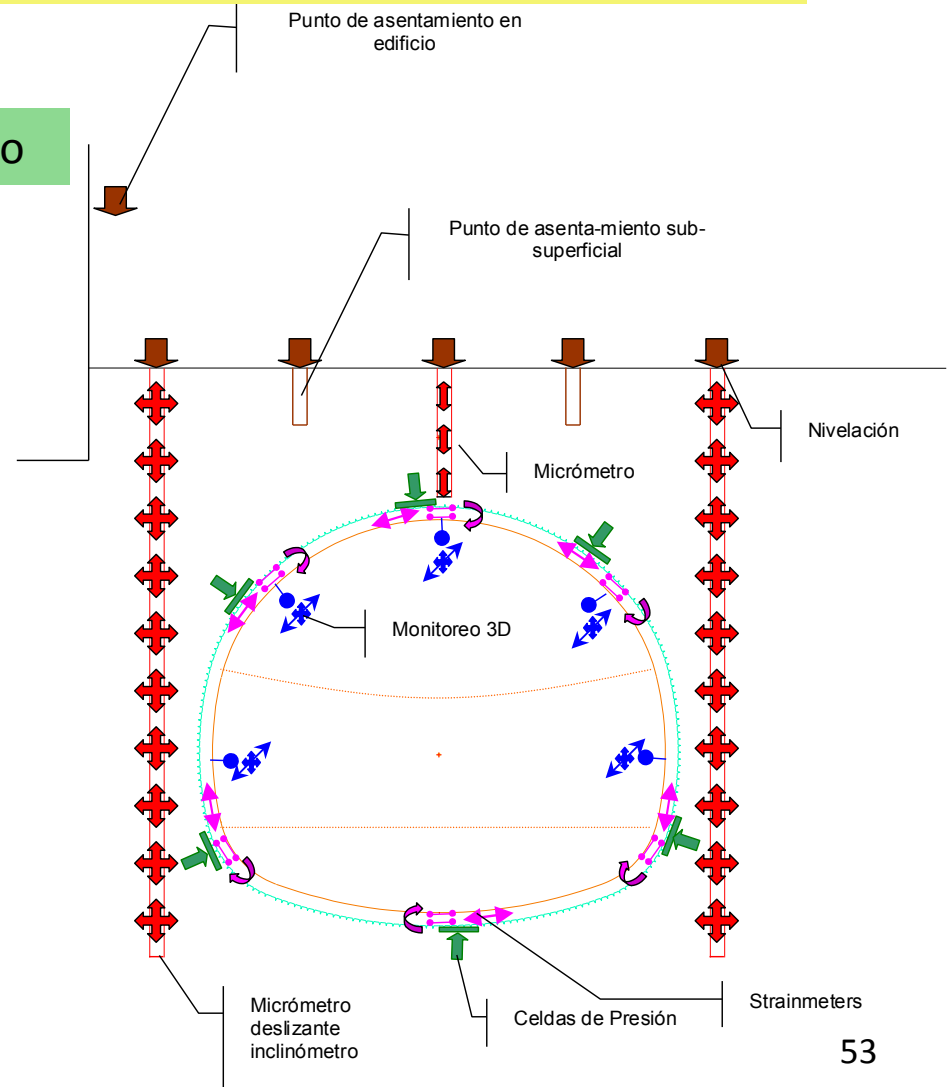
D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Monitoreo de Deformaciones y Geotécnico

Sección Principal de Monitoreo:

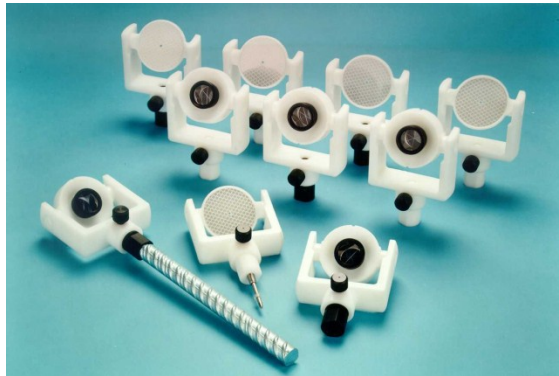
- Monitoreo óptico de deformaciones
- Monitoreo de asentamientos superficiales
- Monitoreo de deformaciones del subsuelo
- Monitoreo de presiones de contacto
- Monitoreo de tensiones en revestimiento



D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Instrumentación para monitoreo de deformaciones óptico en 3D



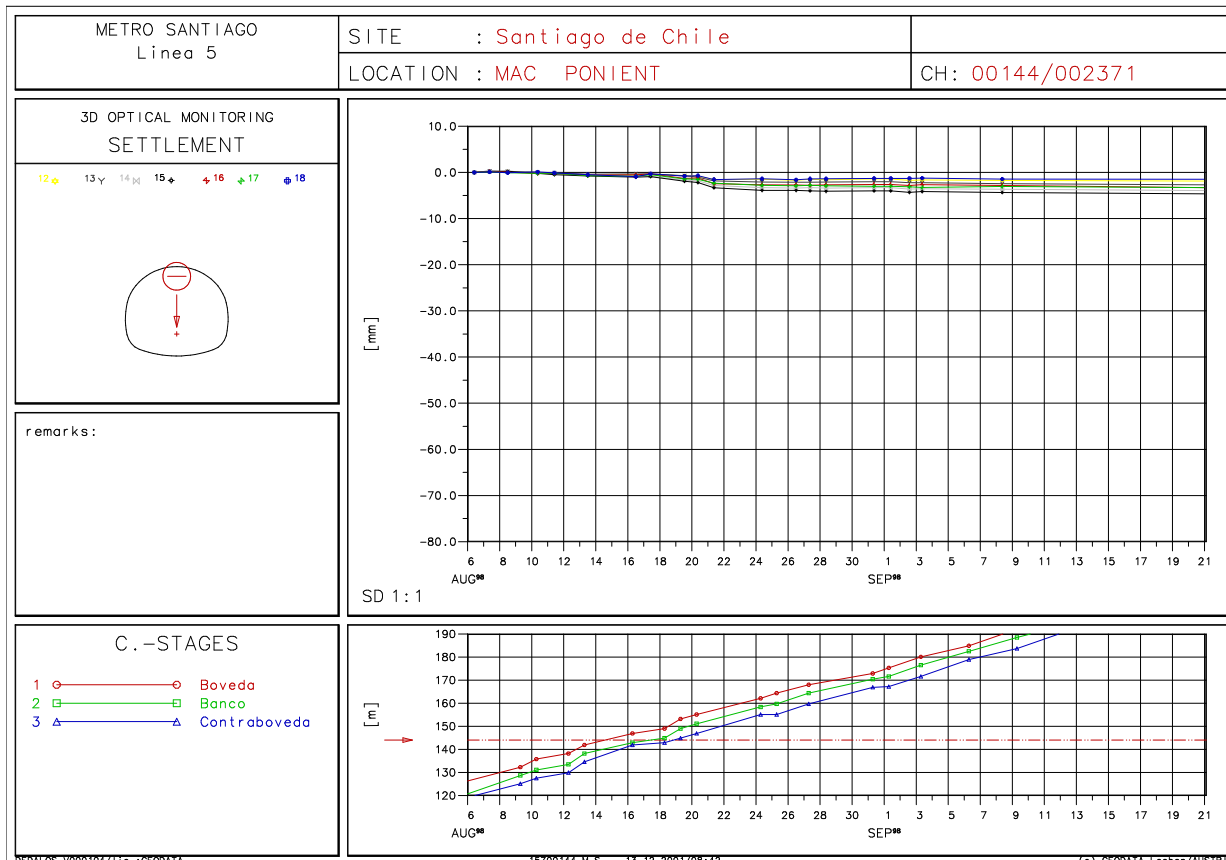
Pernos de convergencia con miras



D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Resultados típicos monitoreo de asentamientos túneles interestación



S_{max.} superficie: 5 - 8 mm

• S_{max.} edificios: 2 - 5 mm

• Predeformación media: 30 %

• Cese deform. detrás de frente: aprox. 20 m

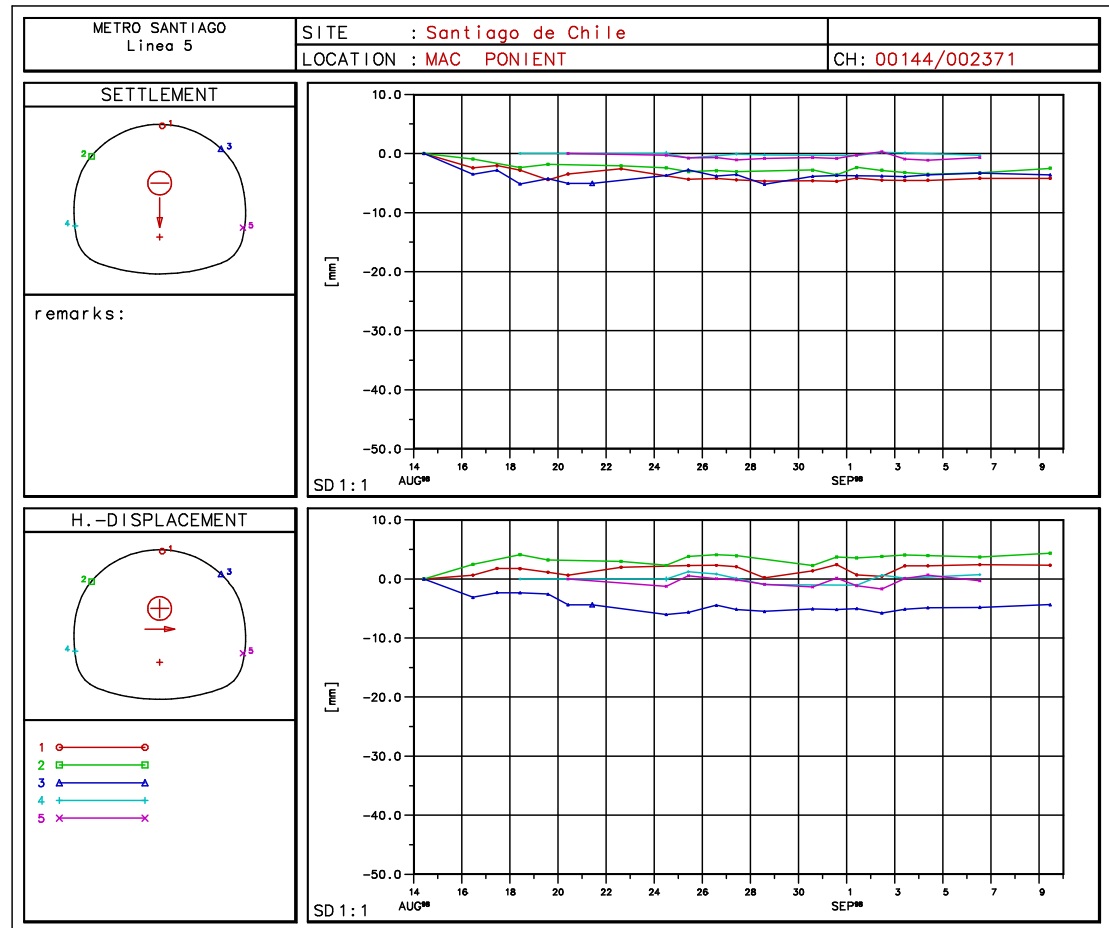
D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Resultados típicos monitoreo de deformaciones internas túneles interestación

Resultados:

- $S_{max. \text{ clave}}$: 3 - 5 mm
- Convergencias: 2 - 3 mm



D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Instrumentación para monitoreo de esfuerzos en revestimiento de Hº Pº



Pares de Strain-gauges para la medición de deformaciones específicas y cálculo de solicitaciones M & N dentro del revestimiento primario

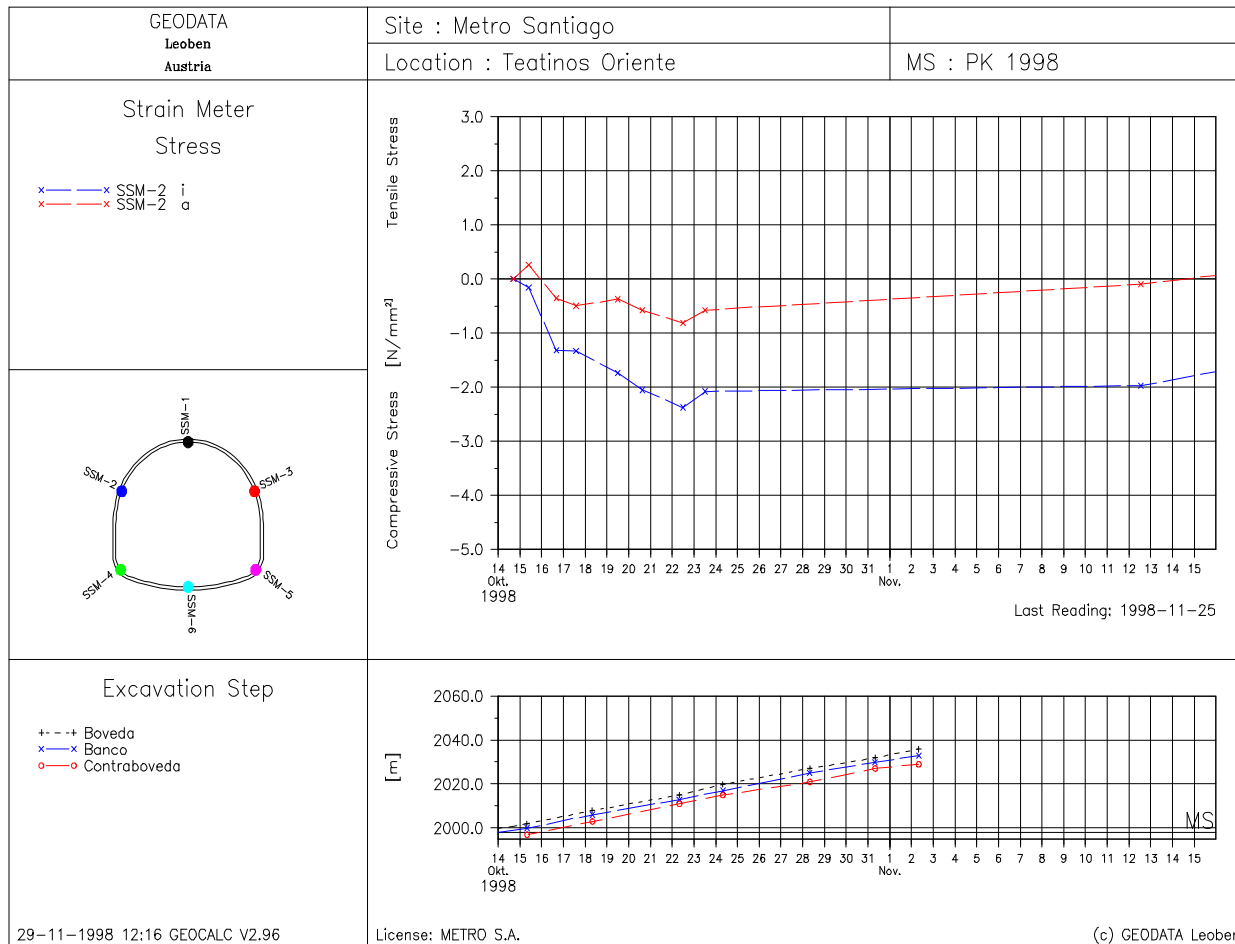
Celdas de Presión para medición presión de contacto revestimiento - suelo



D

Controles y Requerimientos para el Hormigón Proyectado

Resultados de medición de elongaciones unitarias de strainmeters

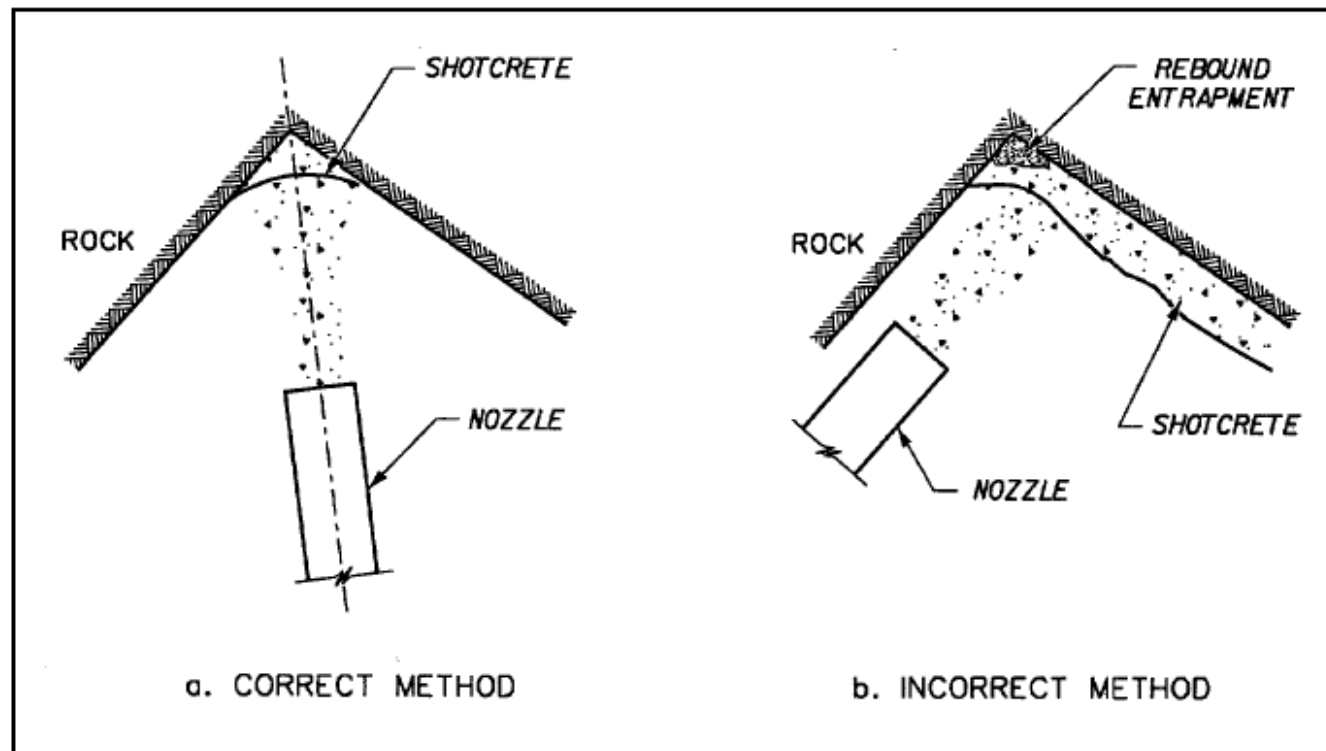


E

Aplicación de Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Calidad de Ejecución

- Técnicas de proyección – ejemplos y recomendaciones – (1 de 4)



E

Aplicación de Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Calidad de Ejecución

- Técnicas de proyección
ejemplos y recomendaciones

(2 de 4)

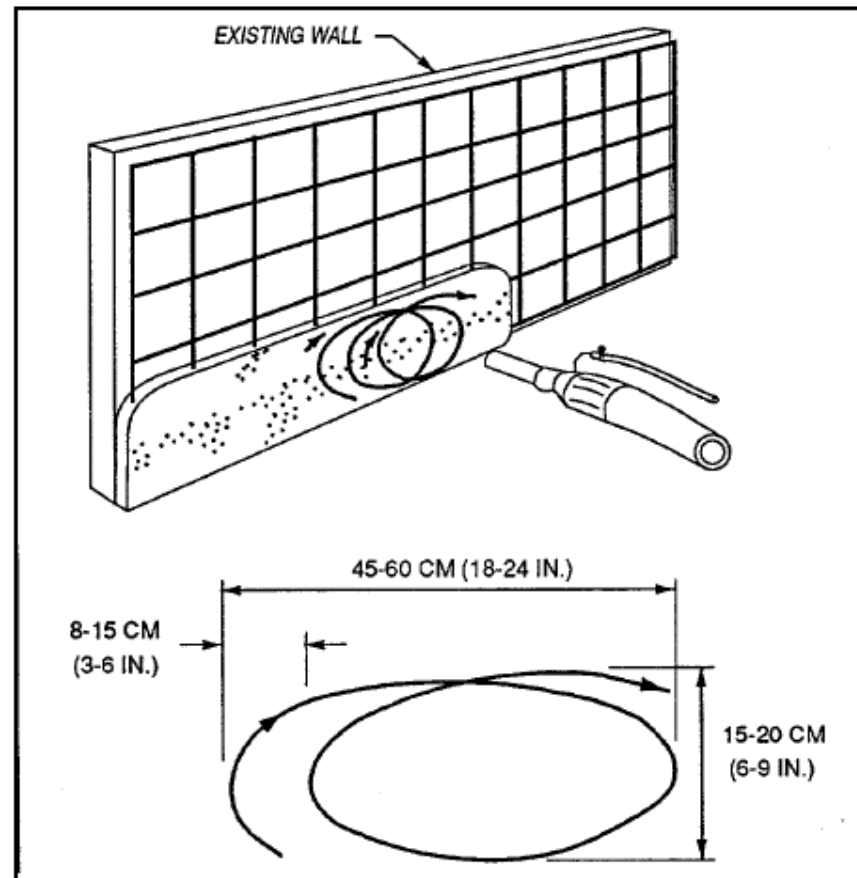


Figure 6-2. Shotcrete nozzle motion (after Ryan 1973)

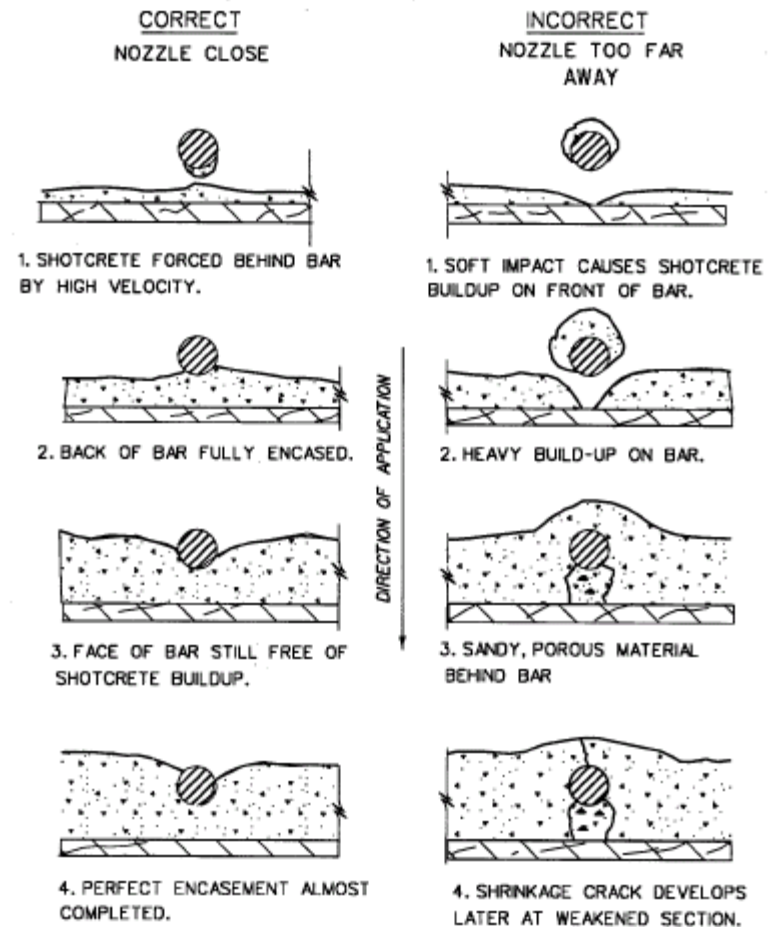
E

Aplicación de Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Calidad de Ejecución

- Técnicas de proyección ejemplos y recomendaciones

(3 de 4)



E

Aplicación de Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Calidad de Ejecución

- Técnicas de proyección
ejemplos y
recomendaciones

(4 de 4)

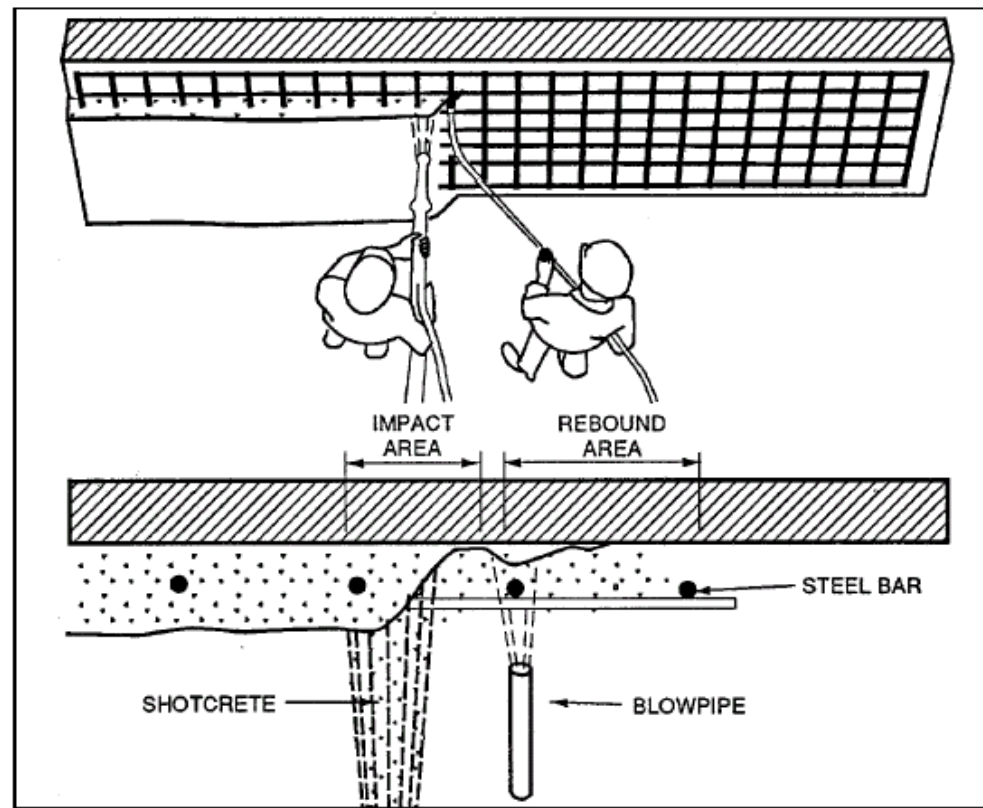


Figure 6-4. Use of a blowpipe in removing rebound for proper encasement of reinforcing bars (after Ryan 1973)

E

Aplicación de Hormigón Proyectado

Hormigón Proyectado – Calidad de Ejecución

- Ejemplos de calidad de ejecución en función de experiencia de pitonero

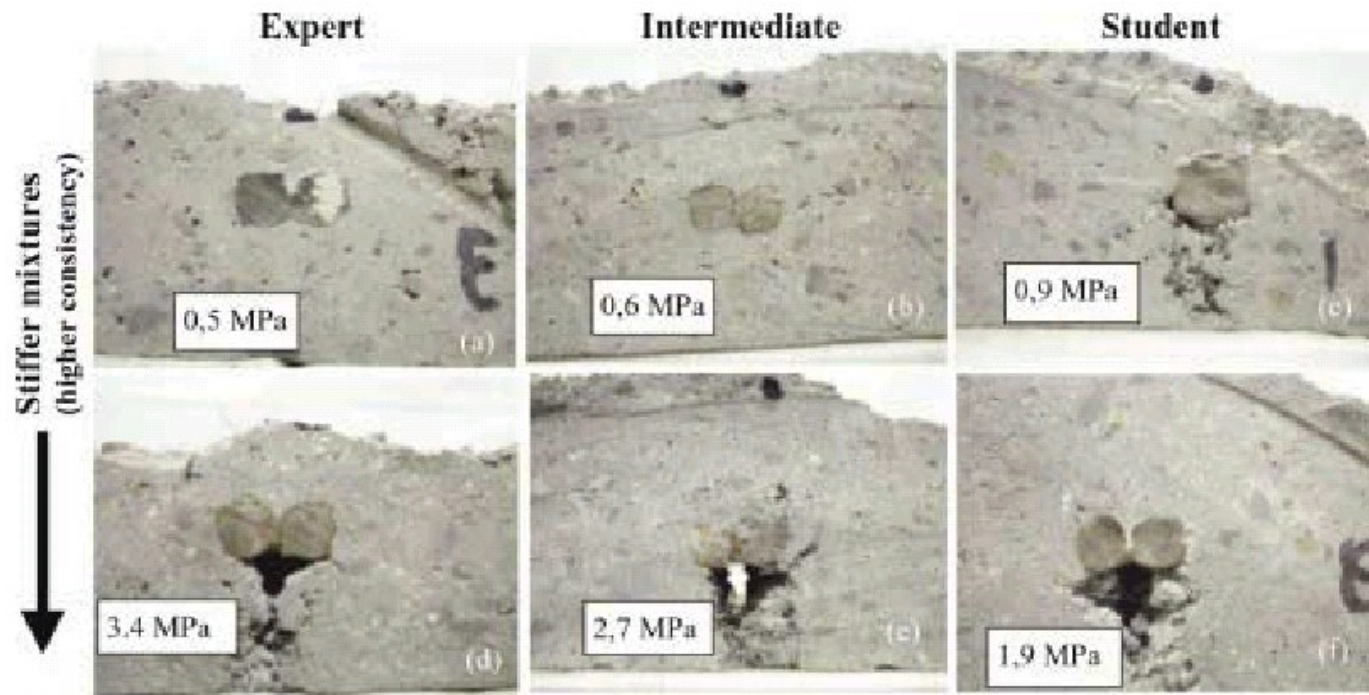
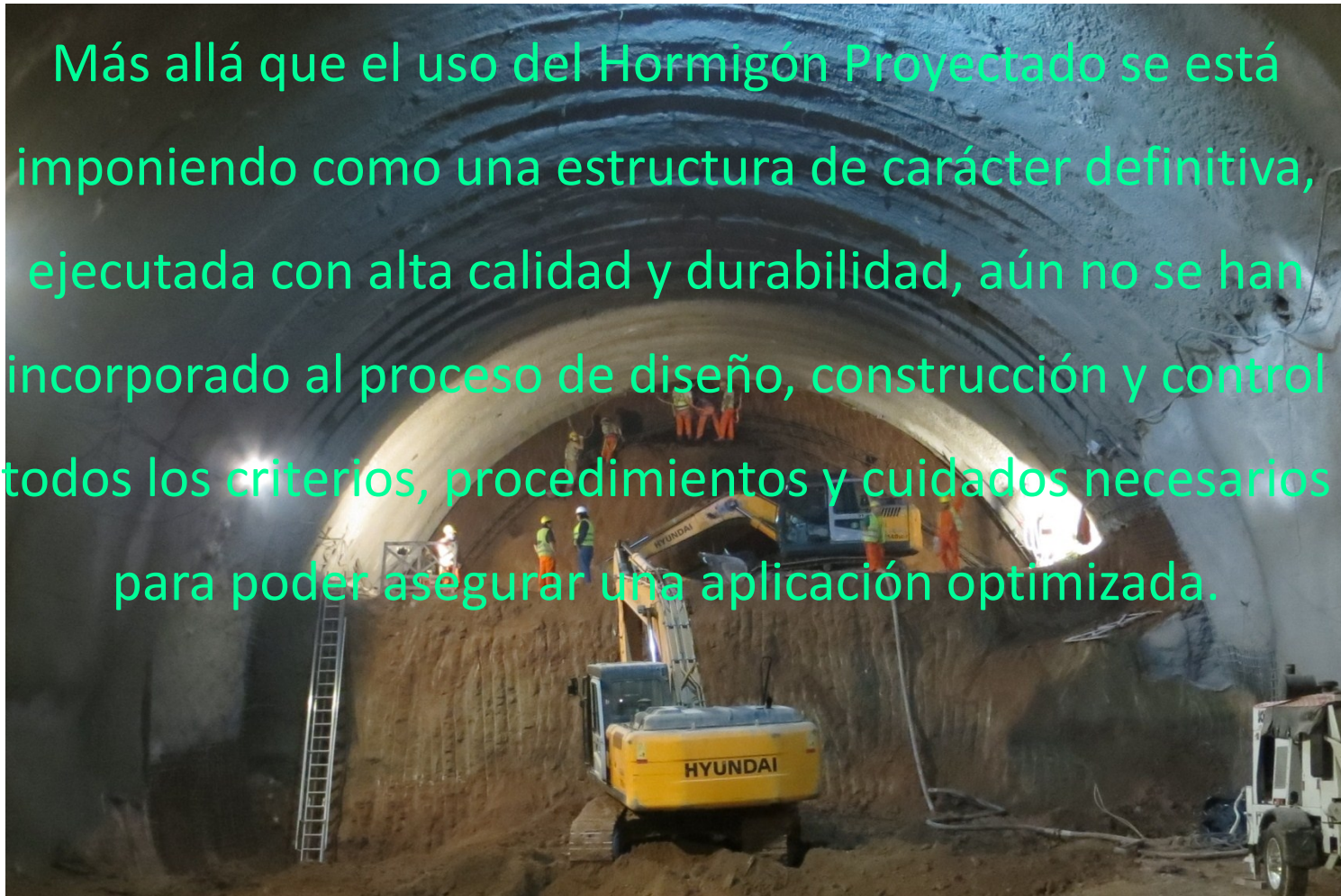


Figure 4: Six examples of reinforcement encasement quality as a function of the shooting consistency and nozzleman experience.

Más allá que el uso del Hormigón Proyectado se está imponiendo como una estructura de carácter definitiva, ejecutada con alta calidad y durabilidad, aún no se han incorporado al proceso de diseño, construcción y control todos los criterios, procedimientos y cuidados necesarios para poder asegurar una aplicación optimizada.



Muchas gracias por su atención!

Ing. Martín Böfer – Geoconsult Buenos Aires S.A.