

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**PROCESO CONSTRUCTIVO DE CONCRETO PROYECTADO  
PARA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA OBRA DEL TUNEL  
DEBAJO DEL RIO RIMAC, LIMA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**ALEXIS MISAEL BOCANEGRA RODRÍGUEZ**

**Lima- Perú**

**2015**

## **DEDICATORIA:**

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración del presente trabajo.

	N° Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>03</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b>	<b>04</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>05</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b>	<b>07</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>08</b>
<b>CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL DEL PROYECTO</b>	<b>09</b>
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	09
1.1.1 Sección 1	09
1.1.2 Sección 2	09
1.2 MÉTODOS DE PROYECCIÓN PARA EL CONCRETO LANZADO	18
1.2.1 Concreto Lanzado por vía seca	18
1.2.2 Concreto Lanzado por vía húmeda	19
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL CONCRETO</b>	<b>21</b>
2.1 MATERIALES	21
2.1.1 Cemento y adiciones	21
2.1.2 Agregados	21
2.1.3 Agua	23
2.1.4 Aditivos	23
2.2 DISEÑO DE MEZCLA	25
2.3 EQUIPOS DE PROYECCIÓN	26
<b>CAPITULO III: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO</b>	<b>28</b>
3.1 EXCAVACIÓN, CORTE Y PERFILADO DE TALUD	28
3.2 CAPA PREVIA DE SHOTCRETE E=2CM, E INSTALACIÓN DE PRIMERA FILA DE ANCLAJES	30
3.2.1 Perforación	33
3.2.2 Anclajes Pasivos	33
3.2.3 Anclajes Activos	35
3.3 ARMADO Y COLOCACIÓN DE LA PRIMERA CAPA DE REFUERZO	36
3.4 SHOTCRETE PRIMERA CAPA	38

3.4.1 Evaluación del concreto en estado fresco	38
3.4.2 Lanzado de concreto	40
3.5 COLOCACIÓN DE SEGUNDA CAPA DE REFUERZO Y SHOTCRETE SEGUNDA CAPA	44
3.6 ASEGURADO DE ANCLAJES Y EJECUCIÓN DE LA SIGUIENTE FILA	46
3.7 METODOLOGÍA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL	49
<b>CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DEL CONCRETO ENDURECIDO</b>	<b>54</b>
4.1 REQUISITOS DE ACEPTACIÓN	56
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>62</b>
5.1 CONCLUSIONES	62
5.2 RECOMENDACIONES	64
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>66</b>

## RESUMEN

El Concreto Proyectado hoy en día se viene utilizando con éxito en diferentes obras referidas a trabajos de estabilización, siendo inicialmente desarrollado para la actividad minera. Actualmente está en expansión hacia el ámbito urbano e incluso en la construcción de estructuras vaciadas contra terreno en proyectos viales.

Para llevar a cabo la realización de la obra Vía Expresa Línea Amarilla, se desvió temporalmente el río mediante la construcción de un canal, para luego ensanchar y profundizar el cauce del río a través de una excavación masiva por niveles abriendo un tajo completo para la posterior construcción del túnel, requiriéndose estabilizar los taludes fijándolos con concreto proyectado. Una vez aplicada sobre la superficie del talud, la capa de concreto endurece pronto para obtener la estabilización.

El objetivo es conseguir una metodología estándar de seguimiento y control del concreto proyectado aplicada a todos los taludes a estabilizar, describiendo los procesos constructivos y cumpliendo con las exigencias de calidad del proyecto. Para este fin, se recopiló las especificaciones técnicas, el Reglamento Nacional de Edificación y normativas del ACI referidas al concreto proyectado. Luego se estableció el método de lanzado por vía húmeda, la que es más acorde a los requerimientos de producción y calidad, así como también su diseño de mezcla correspondiente. Finalmente, se determinó los controles del lanzado del concreto en obra y en estado endurecido.

Para verificar el concreto en estado endurecido, se recopiló información de los ensayos realizados de resistencia a la compresión a las diamantinas extraídas de los paneles o bandejas colocadas en obra. Los resultados se analizaron siguiendo la metodología de la norma peruana E-060 de concreto armado, los mismos que reflejaron ser satisfactorios a los 28 días de edad.

El desarrollo del procedimiento constructivo del concreto proyectado resultó adecuado, toda vez que se siguió las pautas de la norma ACI 506-R y ASTM.

## LISTA DE CUADROS

	N° Pág.
Cuadro N° 1.01: Parámetros de cálculo geotécnicos utilizados	14
Cuadro N° 1.02: Comparación entre los procesos de aplicación del Concreto Proyectado	20
Cuadro N° 2.01: Límites de gradación para combinación de los agregados	22
Cuadro N° 2.02: Ensayo químico del agua, planta Ancieta	23
Cuadro N° 2.03: Dosificación de los componentes en estado seco	25
Cuadro N° 3.01: Tolerancias para asentamientos del concreto fresco cuyo requisito no sea “no exceder” o “máximo”	38
Cuadro N° 3.02: Temperatura mínima aplicable según el tamaño de la sección	39
Cuadro N° 4.01: Ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días	57
Cuadro N° 4.02: Resultados estadísticos	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.01: Trazo del túnel de concreto armado (de 17+060 a 18+860)	11
Figura N° 1.02: Sección tipo 2 (P.K. 17+470 - 17+477)	13
Figura N° 1.03: Desarrollo de presiones tras el ancla	15
Figura N° 1.04: Acero de refuerzo adicional en zona de colocación de anclajes activos a separación horizontal de 1.50 m	16
Figura N° 1.05: Detalle estructural de la pantalla de sostenimiento	17
Figura N° 1.06: Esquema del Concreto Proyectado por vía seca	19
Figura N° 1.07: Esquema del Concreto Proyectado por vía húmeda	20
Figura N° 2.01: Granulometría de la combinación de los agregados	22
Figura N° 2.02: Efecto del aditivo para el control de hidratación	24
Figura N° 2.03: Bomba Bomba "REED Serie A Rockmaster"	26
Figura N° 2.04: Equipo de proyección del Concreto Lanzado	27
Figura N° 3.01: Excavación del primer nivel, profundidad 2.00 a 2.50 m, según indicaciones en los planos	29
Figura N° 3.02: Esquema general de la ubicación y colocado de barbancas	31
Figura N° 3.03: Isometría del talud a estabilizar mediante anclajes en el lado izquierdo (Progresiva 17+595 al 17+620)	32
Figura N° 3.04: Perforación para el colocado de anclajes	33
Figura N° 3.05: Esquema del anclaje activo	35
Figura N° 3.06: Armado y colocación de la 1ra. malla de refuerzo	37
Figura N° 3.07: Correctas posiciones de lanzado, y en modo radial a la superficie	41
Figura N° 3.08: Lanzado horizontal y perpendicular al talud	41
Figura N° 3.09: Manipulación de la boquilla para producir un concreto proyectado uniforme	42
Figura N° 3.10: Lanzado de concreto primera capa	42
Figura N° 3.11: Armado del acero de refuerzo adicional en cabezales de anclajes	45
Figura N° 3.12: Despiece del acero y placa de reparto en cabezal de anclajes	45
Figura N° 3.13: Colocado de segunda capa de refuerzo	46
Figura N° 3.14: Tensado de los anclajes activos con gata hidráulica	47



## LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

ACI: Instituto Americano del Concreto (*en inglés "American Concrete Institute"*).

ASTM: Sociedad Americana para Ensayos de Materiales (*en inglés "American Society for Testing Materials"*).

°C: Grados Celsius.

°F: Grados Fahrenheit

f'c: Resistencia a la compresión del concreto, en Kg-f / cm<sup>2</sup>.

NTP: Norma Técnica Peruana.

pH: Potencial de hidrógeno.

P.K.: Progresiva kilómetro.

ppm: Unidad de medida "partes por millón".

PVC: Policloruro de vinilo.

T<sub>FN</sub>: Tensión máxima en el ancla por flexión.

## INTRODUCCION

La lentitud del tráfico vehicular en la ciudad de Lima es a consecuencia del crecimiento del parque automotor que ha experimentado en las últimas décadas, siendo la nueva Vía Expresa Línea Amarilla un proyecto que buscará contribuir al ordenamiento del tránsito vehicular en 11 distritos y aliviando el tránsito en la Vía de Evitamiento. Esta misma incluye un túnel de concreto armado de 1,600m de recorrido por debajo del río Rímac cuyo talud adyacente a generarse requiere ser estabilizado mediante concreto proyectado.

El desarrollo del capítulo I se refiere a la descripción del proyecto y de la estabilización de taludes a realizar dentro del entorno de la obra que se realiza, eligiendo además el método de proyección.

En el capítulo II se determina el diseño de mezcla y el equipo de proyección del concreto en base a los requerimientos de producción y calidad, explicando cada uno de sus elementos como son el cemento, agregados, aditivos, entre otros.

El capítulo III describe el procedimiento constructivo y los controles para el seguimiento del mismo, cumpliendo los requerimientos de las especificaciones técnicas, planos del proyecto y normas técnicas peruanas y/o extranjeras vigentes afines.

En el capítulo IV se evalúa los resultados del lanzamiento del concreto mediante ensayos de compresión a los 28 días, tomados a través de bandejas normadas.

## CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL DEL PROYECTO

### 1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La nueva Vía Expresa Línea Amarilla es un proyecto que buscará contribuir al ordenamiento del tránsito vehicular en 11 distritos y aliviando el tránsito en la Vía de Evitamiento en la ciudad de Lima. Se ha dividido en 2 secciones las que conformen este proyecto:

**1.1.1 Sección 1:** Conformada por 16 km de vías ya existentes. Es un tramo de la Vía de Evitamiento, que va desde el Trébol de Javier Prado hasta el Ovalo Habich. Las obras a realizar constan de mejorar y modernizar estas vías, además de ampliar un carril adicional de 9 km entre la Av. Javier Prado y el Puente Huáscar.

**1.1.2 Sección 2:** Compuesto por las siguientes obras principales:

- *Túnel por debajo del Río Rímac:* Su construcción es de manera subterránea para respetar el carácter de Patrimonio de la Humanidad que tiene el Centro Histórico de Lima. Uno de sus extremos se ubica a 200 metros de la Av. Tacna hacia el Oeste, y se prolongará hasta el puente Huánuco. En total tendrá una extensión aproximada de 1,800 m. Sus principales características son:
  - o 6 carriles, 3 en cada sentido.
  - o 27 metros de ancho y 6 metros de altura en promedio.
  - o Circuito cerrado de televisión.
  - o Ventiladores de turbina, utilizados en diversos países, especialmente para redes de metro y túneles.
  - o Sistema de extinción de incendios y detectores de humo.
  - o Sistemas de comunicación de emergencias.
  - o 4 salidas de emergencia, 2 para cada sentido de circulación.
  - o 2 pasos peatonales y vehiculares para emergencias.
  - o Un Centro de Control de Operaciones.
- *Viaductos:* El Proyecto implica la construcción de 12 nuevos viaductos complementarios:

- Viaducto 1: Av. Universitaria - Av. Morales Duárez (Cercado de Lima).
  - Viaducto 2: Av. Dueñas - Av. Morales Duárez (Cercado de Lima).
  - Viaductos 3, 4, 5 y 6: Sector de 1º y 2 de Mayo (Morales Duárez -Cercado de Lima).
  - Viaducto 7: Zona de Huascarán (Rímac).
  - Viaducto 8: Zona de Cantagallo y la Av. Sebastián Lorente.
  - Viaductos 9 y 10: Vía de Evitamiento y el Puente Huáscar.
  - Viaducto 11: San Juan de Lurigancho (Cercado de Lima).
  - Viaducto 12: Av. Las Palmeras (Surco).
- *Nuevas vías, reforzamiento de muros de construcción y áreas verdes:* Serán 9 km de nuevas vías que integrarán los viaductos con el túnel y gran parte de ellas estarán ubicadas en la margen izquierda del río Rímac, de las cuales 6 km de la ribera del río en este tramo, será reforzada con muros de contención. Asimismo se mejorará el aspecto y aportará al medio ambiente de la zona con la creación de nuevas áreas verdes junto al río Rímac.

Es en la construcción de los 1,800 m de túnel de concreto armado por debajo del río Rímac el entorno donde se encuentran los trabajos de estabilización de taludes. Estos mismos generados adyacentes al túnel, se estabilizaron mediante anclajes y concreto proyectado según las especificaciones del proyecto.

La metodología constructiva para la ejecución del túnel consistió en el desvío temporal del río mediante la construcción de un canal de concreto armado, y la estabilización de los taludes de excavación para abrir un tajo completo para la construcción posterior del túnel mediante métodos convencionales. El túnel en mención se extiende entre las Progresivas 17+060 y 18+860 y se constituyen de 46 módulos independientes separados por juntas de construcción, de las cuales 44 de ellos son de 40 m de longitud y los 2 restantes son de 20 m.

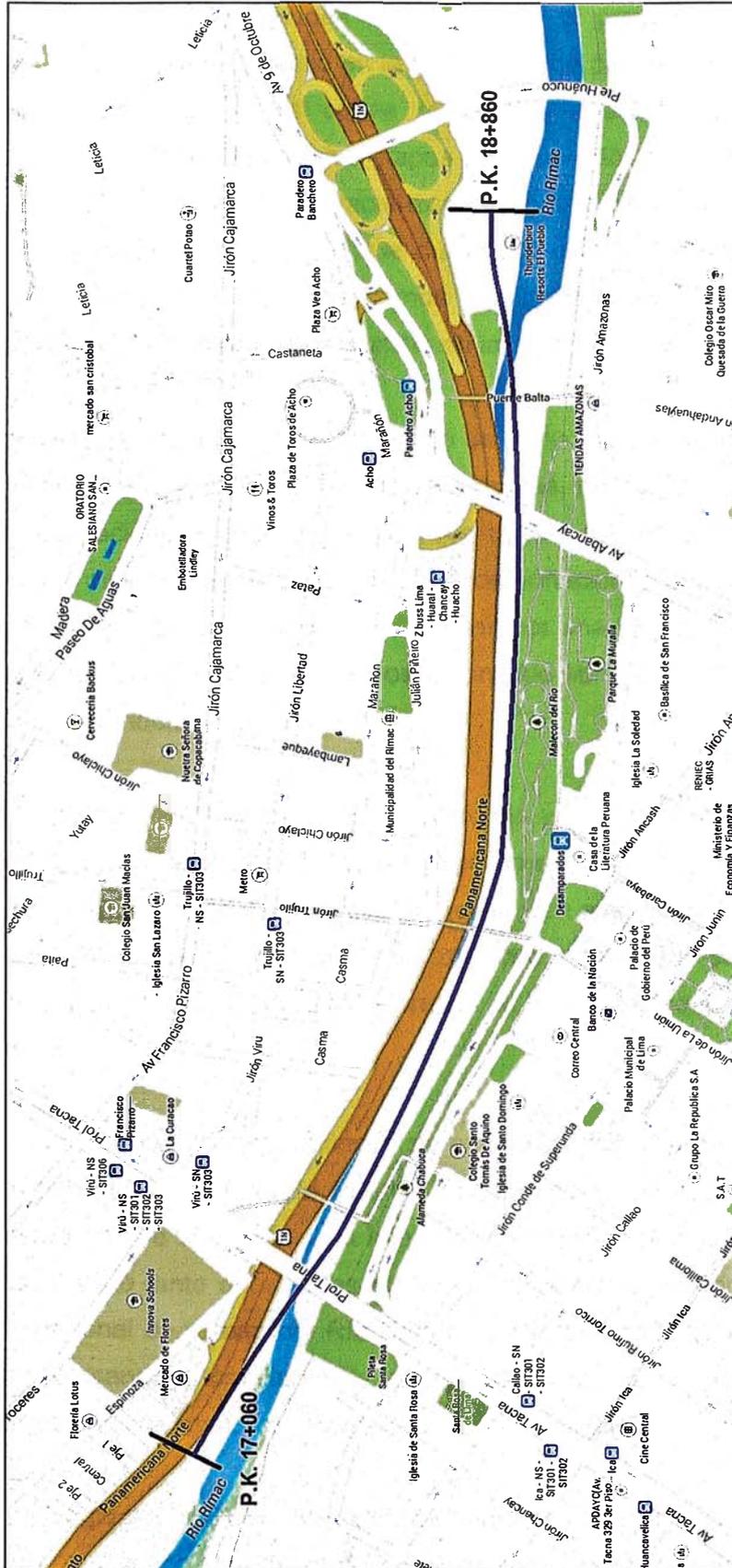


Figura N° 1.01: Trazo del túnel de concreto armado (de 17+060 a 18+860).

Fuente: Página web "Google Maps", 27 de noviembre de 2014, 14:30 h. <https://maps.google.com/>

Para la estabilización de los taludes de excavación el proyecto establece la tecnología Soil Nailing, que consistió en la instalación de pernos pasivos de alta resistencia que aportaron a los cortes realizados la suficiente resistencia garantizando su estabilidad durante las etapas de excavación y construcción del túnel. Los elementos pasivos se caracterizan por entrar en carga cuando se produce una deformación, es por ello que durante la excavación de la obra se previeron estas deformaciones y los pernos se han cargado. El sistema de protección de la estabilidad descrita consistió en la entibación mediante concreto proyectado.

Deformaciones en los taludes ubicados debajo de estructuras importantes como los pilares del puente Rayos de Sol no son admisibles, por lo que se redujeron mediante la aplicación de anclajes activos, los cuales se sometieron a carga desde el primer momento y no se necesitó de deformaciones adicionales para que entren en carga. Estos anclajes se componen por una longitud de bulbo de pasta endurecida (agua y cemento) y por la longitud libre que se utilizó para poder tensarlo, dejándolo en servicio.

Cabe mencionar que dentro de las consideraciones y convenciones de diseño del presente proyecto, las progresivas aumentan en el sentido aguas arriba del Río Rímac (contrario al curso del río). Por tal motivo y en adelante en el presente Informe de Suficiencia, se denominará talud izquierdo a aquel que se encuentre a la margen derecha del río, y talud derecho al que se ubique al margen izquierda del río.

En el lado izquierdo de las excavaciones se encuentra el canal de desviación temporal del Río Rímac y detrás de éste la Vía Evitamiento. En el lado derecho de las excavaciones se encuentra una línea de tren de mercancías en la parte alta del talud. Por lo tanto durante las excavaciones se tuvo en consideración evitar dañar el canal de desvío del Río Rímac, la Vía Evitamiento, la línea del ferrocarril de mercancías, los pilares del puente peatonal Rayos de Sol y otras estructuras que pudieran generar deformaciones no admisibles.

En la siguiente figura N° 1.02 se muestran de forma esquemática una sección a analizar, que coincide con el tramo principal del Puente Rayos del Sol:

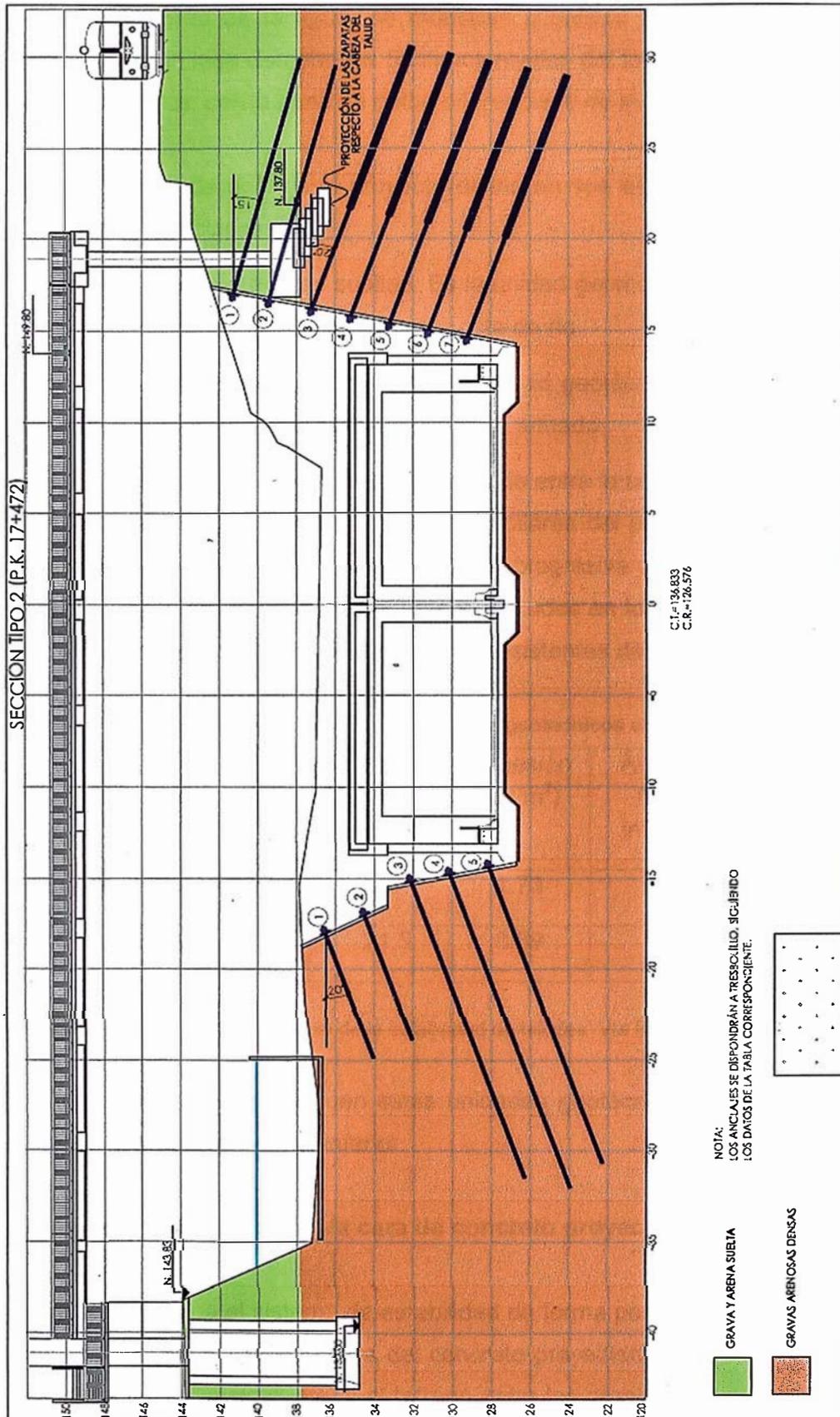


Figura N° 1.02: Sección tipo 2 (P.K. 17+470 - 17+477).

Fuente: Planos del túnel "Estabilidad de taludes" Vía Expresa Línea Amarilla.

En el lado izquierdo de la figura se muestran 5 niveles de anclajes pasivos; mientras que en el lado derecho los 5 últimos niveles del total de 7 se refieren a los anclajes activos, con la zona de bulbo diferenciado de su zona libre.

En la zona objeto de análisis el proyecto define en sus estudios dos unidades geotécnicas diferenciadas:

- Unidad A: Gravas y arenas sueltas. Es la unidad geotécnica más superficial, y su base se sitúa aproximadamente a cota de río.
- Unidad B: Grava arenosa densa. Es la unidad geotécnica profunda, donde se apoya la estructura del túnel de concreto armado.

Los estudios del proyecto plantearon que el límite entre la unidad A y la unidad B se encuentra a la cota de cimentación de los pilares del puente situados en la margen izquierda del río (lado derecho según la progresiva del túnel).

Los parámetros geotécnicos considerados y utilizados en los cálculos, aplicando los Factores de Reducción de los Parámetros resistentes del suelo son:

Cuadro N° 1.01: Parámetros de cálculo geotécnicos utilizados.

Unidad	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción interna (°)	Módulo Young (MPa)
A – Gravas y arenas sueltas	20	1.73	28.69	80
B – Grava arenosa densa	21.5	8.69	32.17	200

Fuente: Documento técnico "Estudio de la estabilidad de taludes" Vía Expresa Línea Amarilla.

En la figura N° 1.02 se distinguen estas unidades geotécnicas, unidad A en la parte superior y unidad B en el inferior.

### **Determinación estructural de la cara de concreto proyectado:**

El proyecto menciona el sistema de estabilidad de forma permanente. Dentro del sistema de anclas diseñado la cara del concreto proyectado tiene la función de proporcionar confinamiento lateral al terreno entre las propias barras, por lo que su diseño contempla la determinación del espesor de material necesario, la

calidad de los materiales, el cálculo del armado y las dimensiones de la chapa de anclaje de la barra.

A grandes rasgos, la cara de concreto debe retener localmente el suelo entre las anclas; el primer parámetro determinante en el diseño es la separación entre las barras: cuanto mayor sea su separación más se aproximará el problema a un muro de retención convencional. Por otro lado, la distribución de la presión no es uniforme: el efecto arco tiende a desarrollarse en horizontal y vertical, concentrando las tensiones en los alrededores de las anclas.

La incertidumbre en la presión desarrollada y su distribución hace adoptar hipótesis conservadoras a la hora de diseñar esta parte del sistema, los modos de fallo críticos a contemplar en el diseño de la cara de concreto son la flexión y el punzonamiento.

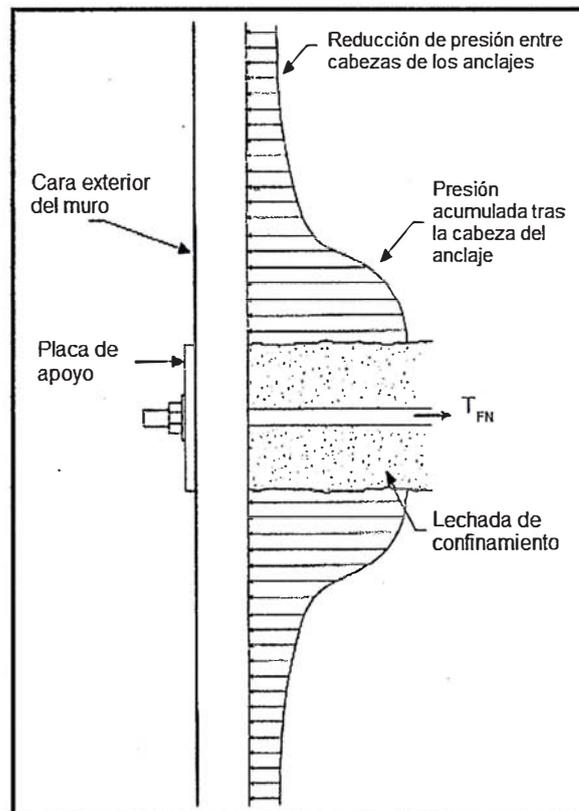


Figura N° 1.03: Desarrollo de presiones tras el ancla.

Fuente: Documento técnico "Estudio de la estabilidad de taludes" Vía Expresa Línea Amarilla.

A partir de los resultados del cálculo, éste determinó lo siguiente:

- Espesor de la cara de concreto proyectado mínimo de 150 mm, exclusivo para la pantalla de sostenimiento y con resistencia a compresión a los 28 días de 280 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Armado base con doble malla electrosoldada cuadrada de 8 mm a cada 10 cm en horizontal y vertical.  
Este armado se refuerza en la primera capa (capa inferior) en el entorno de las anclas activas con 8 varillas de 16 mm verticales y 4 varillas de 12 mm horizontales. En el entorno de las anclas pasivas a 1.50 m de separación horizontal, con 6 varillas de 16 mm verticales y 4 varillas de 12 mm horizontales; y para la separación horizontal de 3 m, el refuerzo es de 10 varillas de 16 mm horizontales y 6 varillas de 16 mm verticales.
- Las chapas o placas de acero de conexión corresponden cuadradas de 200 x 200 x 35 mm.

En la figura N° 1.04 se muestra la distribución del acero interpretado de los resultados del cálculo para los anclajes activos. Los demás esquemas se muestran en los planos adjuntados en los anexos.

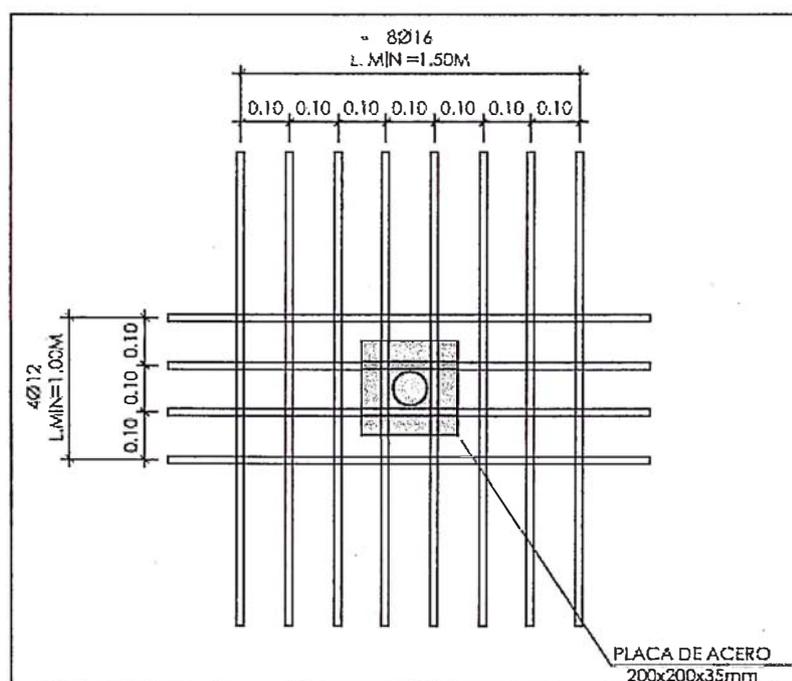


Figura N° 1.04: Acero de refuerzo adicional en zona de colocación de anclajes activos a separación horizontal de 1.50 m.

Fuente: Planos del túnel "Detalles estructurales" Vía Expresa Línea Amarilla.

En la figura N° 1.05 se observa a detalle la estructuración de la pantalla de sostenimiento, que es típico en todos los tramos.

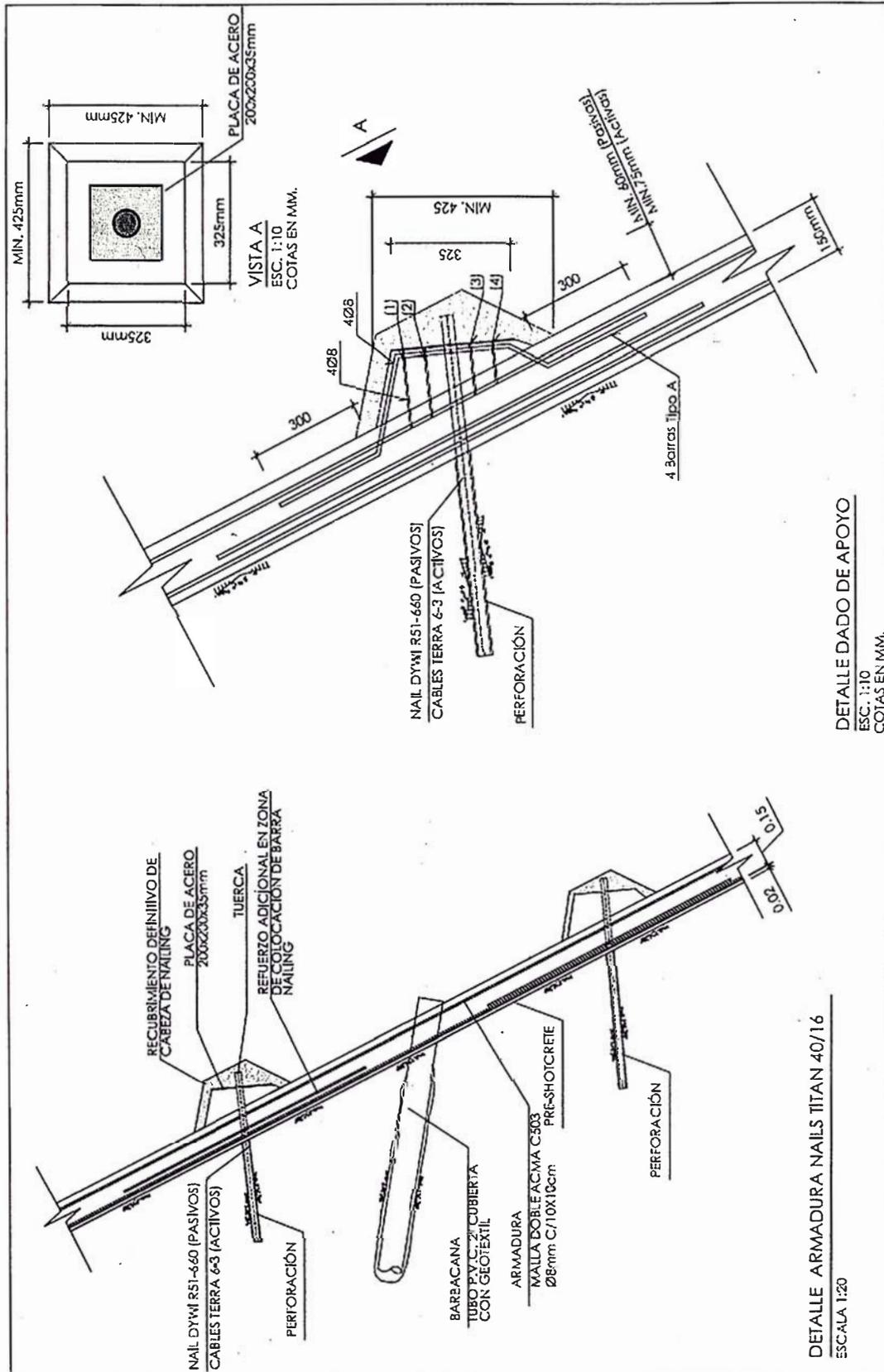


Figura N° 1.05: Detalle estructural de la pantalla de sostenimiento.

Fuente: Planos del túnel "Detalles estructurales" Vía Expresa Línea Amarilla.

## 1.2 DEFINICION DE CONCRETO PROYECTADO

El concreto proyectado (Shotcrete) es aquel concreto lanzado neumáticamente a gran velocidad contra una superficie a través de una manguera y boquilla. Está constituida por una mezcla de cemento, aditivo acelerante, agua, arena y agregado. El objetivo es obtener un concreto con una buena compactación, resistencia acelerada, buena adherencia y tenacidad.

Como cualquier método de construcción, el procedimiento de lanzado se encuentra sometido a principios y técnicas que se reflejan en la calidad del concreto colocado. El ACI en EE.UU. ha desarrollado guías y especificaciones que permiten realizar los trabajos de lanzado de concreto, dentro de estándares y parámetros establecidos. El ACI hace referencia al Concreto Proyectado en el reporte del comité 506, ACI 506R-05 con el título “*Guide to shotcrete*”, correspondiente a octubre del 2005 y en el reporte ACI 506.1R-98 para las fibras metálicas y sintéticas revisado en 1998.

Se conocen en la actualidad dos métodos conocidos para la colocación del Concreto Proyectado:

**1.2.1 Concreto Proyectado por vía seca:** Es cuando se le añade agua para hidratar la mezcla en la boquilla de lanzamiento a la salida. Se utiliza una tubería flexible por la que se sopla la mezcla seca de concreto, puede transportarse cualquier mezcla seca por una corriente de aire en cuyo caso las partículas son arrastradas por dicho medio adicionándose agua por la tobera inyectora al final de la tubería. La velocidad del aire debe ser lo suficiente para que el material no pueda depositarse en el tubo flexible.

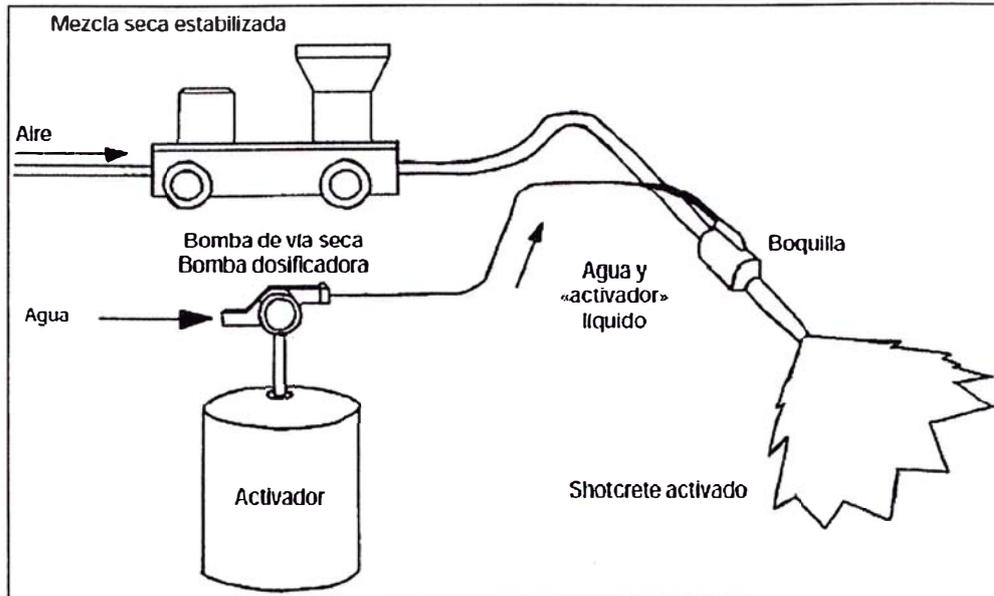


Figura N° 1.06: Esquema del Concreto Proyectado por vía seca.

Fuente: Alegre, Víctor. Conferencia diseño de concreto lanzado – Shotcrete, Lima 2014.

**1.2.2 Concreto Proyectado por vía húmeda:** Es cuando la mezcla transportada ya tiene el agua de hidratación necesaria incorporada. Este procedimiento de proyección en húmedo usa concreto premezclado y se transporta al lugar de colocación a baja velocidad. Este procedimiento lleva al concreto a una tobera inyectora mediante una bomba de concreto, en dicha tobera se le agrega una cantidad regulada y controlada de aditivo acelerante de fragua y se usa aire comprimido para descargar el concreto. Al hacer uso de este procedimiento, se produce poco polvo y las pérdidas por rebote son en cantidades menores a las del procedimiento en seco.

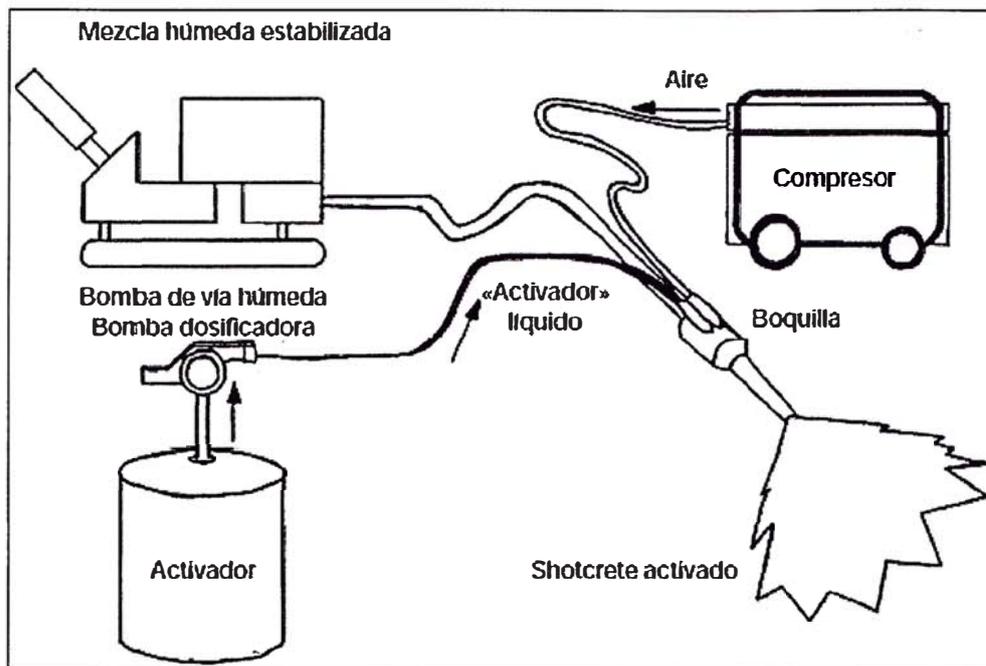


Figura N° 1.07: Esquema del Concreto Proyectado por vía húmeda.

Fuente: Alegre, Víctor. Conferencia diseño de concreto lanzado – Shotcrete, Lima 2014.

El Concreto Lanzado para este proyecto se aplicó mediante proceso o vía húmeda para reducir el rebote y los problemas de polvo, además de atender los requerimientos de producción de concreto masivos.

Cuadro N° 1.02: Comparación entre los procesos de aplicación del Concreto Proyectado.

Aplicación por vía seca	Aplicación por vía húmeda
1. Control instantáneo del agua de la mezcla al proyectarlo, por lo que el a/c tiende a variar.	1. El agua de la mezcla se mide a precisión en la planta. Relación a/c controlada.
2. Más adecuado para mezclas con agregados de peso ligero y con requerimiento de propiedades de resistencia temprana.	2. Mayor garantía de un buen mezclado del agua con los demás componentes del concreto.
3. Capaz de ser transportado largas distancias.	3. Menor pérdida de polvo cemento durante el lanzado.
4. Conveniente para la aplicación de pocos volúmenes.	4. Menor rebote y menos desperdicio de material.
5. Capacidad de obtener mayores resistencias.	5. Capacidad de mayor producción.

Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO II: MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL CONCRETO

### 2.1 MATERIALES

**2.1.1 Cemento y adiciones:** El cemento utilizado fue el Portland Tipo V por su característica de alta resistencia a la acción de los sulfatos, el cual cumple lo especificado en la Norma Técnica Peruana NTP 334.009 y NTP 334.090.

Adicionalmente como material cementante se empleó Filler calizo. Esto se debe a que se requirió reemplazar parte del cemento Portland para cambiar algunas propiedades, como son aumentar la trabajabilidad de la mezcla, disminuir la exudación y segregación, mejorar la resistencia al intemperismo, generar menor calor de hidratación y reducir la permeabilidad.

Las puzolanas se dividen en dos grupos: naturales y artificiales. Las naturales están formadas por enfriamiento rápido de la sílice contenida en la lava de las erupciones volcánicas, siendo sustancias ricas en óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). El filler viene a ser una adición mineral, captada por filtros especiales durante el proceso de clinkerización de la materia prima para la producción de cemento, en la que partículas muy finas precalcinadas tienden a separarse del proceso y volatilizarse. Son más livianos a comparación del cemento estándar, deben estar libres de contaminación de materia orgánica o arcilla, y está considerado en la NTP 334.090 y ASTM C 1157-00.

Pese a ello, se tuvo que prestar atención a las desventajas que se pudiera presentar, como presenciar una mayor retracción durante la hidratación o un desarrollo más lento de las resistencias tempranas. De igual modo, se recomienda un curado del concreto continuo y un adecuado control de calidad.

**2.1.2 Agregados:** El agregado utilizado cumplió con los requisitos de las especificaciones para agregados de concreto (ASTM-C-33). Sus partículas estuvieron limpias, duras, compactas y resistentes; libres de partículas escamosas, materia orgánica u otras sustancias dañinas.

Tanto para los procesos de proyección por vía seca y húmeda del concreto proyectado, el agregado grueso tiene un mayor rebote en comparación con el fino, es más difícil de tratar su acabado, y no puede ser utilizado para capas delgadas o cuando se presente considerable acero de refuerzo en la pantalla de sostenimiento, tal como es nuestro caso.

Cuadro N° 2.01: Límites de gradación para combinación de los agregados.

Tamaño del tamiz	Porcentaje que pasa por peso		
	Gradación N° 01	Gradación N° 01	Gradación N° 03
3/4" (19 mm)	-	-	100
1/2" (12 mm)	-	100	80-95
3/8" (10 mm)	100	90-100	70-90
N° 4 (4.75 mm)	95-100	70-85	50-70
N° 8 (2.4 mm)	80-100	50-70	35-55
N° 16 (1.2 mm)	50-85	35-55	20-40
N° 30 (600 µm)	25-60	20-35	10-30
N° 50 (300 µm)	10-30	8-20	5-17
N° 100 (150 µm)	2-10	2-10	2-10

Fuente: Norma técnica ACI 506R "Guide to Shotcrete".

La mezcla de los agregados tuvo la dimensión máxima de 10 mm. Para nuestro caso seleccionamos una gradación correspondiente al agregado fino, que viene a ser la Gradación N° 01 del Cuadro N° 2.01, buscando además poder obtener una mejor trabajabilidad. Las gradaciones N° 02 y N° 03 permiten la presencia del agregado grueso.

La granulometría de la combinación de los agregados es la siguiente:

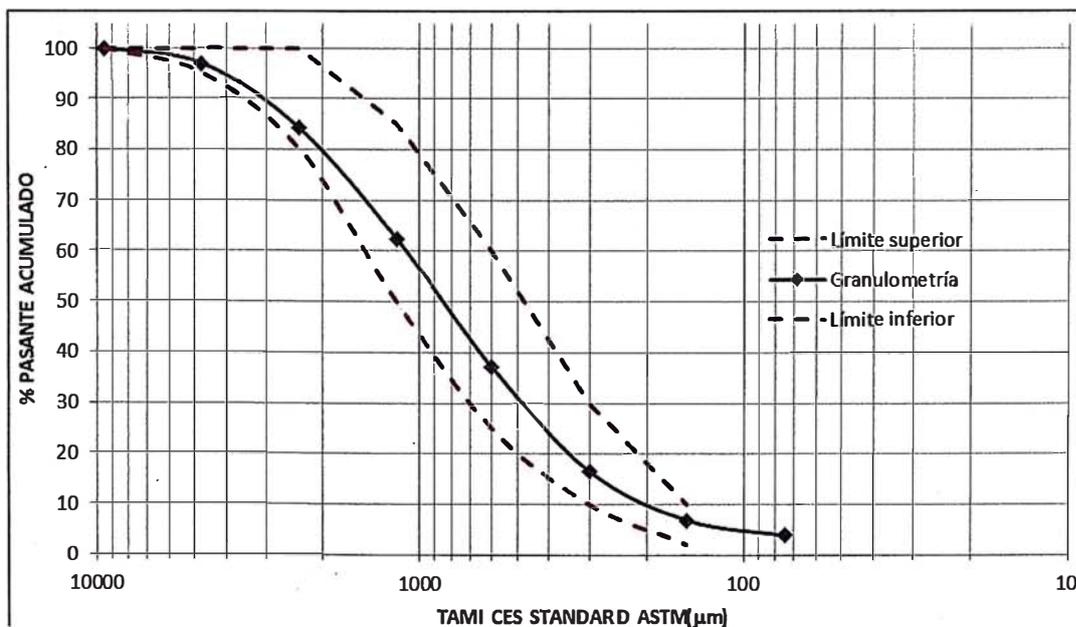


Figura N° 2.01: Granulometría de la combinación de los agregados.

Fuente: Elaboración propia.

**2.1.3 Agua:** Se verificó con la NTP 339.088. En el Capítulo II referente a los materiales, del “*Guide to Shotcrete*” del ACI 506R-05, existe un acápite para el agua de la mezcla, indicando que el agua en todo momento debe estar limpia y libre de sustancias que pudieran dañar al concreto o acero de refuerzo.

Cuadro N° 2.02: Ensayo químico del agua, planta Ancieta.

ENSAYO	AGUA	LIMITE PERMISIBLE	REFERENCIA MÉTODO
Residuos sólidos totales (ppm)	732.0	5000 Max	NTP 339.071
Contenido de sulfatos (ppm)	545.0	1000 Max	NTP 339.074
Contenido de cloruros (ppm)	107.2	1000 Max	NTP 339.076
pH 22.8 °C	7.34	5.5 Mín	NTP 339.073
Alcalinidad 23° (ppm)	87.5	1000 Max	ASTM D 1067

Fuente: Informe de ensayos químicos del concreto premezclado Unicón – Vía Expresa Línea Amarilla.

**2.1.4 Aditivos:** Los aditivos cumplieron con los requisitos de las Normas establecidas, en la cual se tomó atención a las indicaciones y dosificaciones del fabricante. De acuerdo a la Norma ASTM C 494 los aditivos se clasifican en:

- TIPO A: Reductores de agua.
- TIPO B: Retardadores de fragua.
- TIPO C: Acelerantes.
- TIPO D: Reductores de agua-retardadores de fragua.
- TIPO E: Reductores de agua-acelerantes.
- TIPO F: Super Reductores de agua.
- TIPO G: Super Reductores de agua-acelerantes.

Definiremos aquellos aditivos empleados en nuestro diseño de concreto:

- Los reductores de agua se emplean con la finalidad de reducir los requisitos de agua en la mezcla requerida para producir un concreto con cierto asentamiento, también permite reducir la relación agua cemento o para aumentar el asentamiento, los reductores de agua típicos reducen el contenido de agua de 5% a 10%; los de alto rango (superplastificantes) de 12% a 30%; también permite controlar las condiciones de trabajabilidad de la misma, o ambas.

Los superplastificantes reducen de forma importante el contenido de agua del concreto manteniendo una consistencia dada y sin producir efectos indeseables sobre el mismo. Se agregan a los concretos de agua/cemento bajos a normales para producir concretos fluidos de alto asentamiento, son muy fluidos y trabajables. Se usan porque actúan bien como dispersadores de finos, esta cualidad lo convierte en aditivos ideales para el Concreto Proyectado. Se eligió el aditivo *Rheobuild 1000* Tipo F.

- Los aditivos para el control de hidratación se adicionan para mantener la trabajabilidad durante el tiempo de transporte del concreto, y aplicarlo sin reducir la calidad de la misma. En general, este aditivo no tiene influencia en la dosificación del aditivo acelerante. Empleamos el aditivo *Delvo Stabilizer*. Su efecto se ilustra en la figura N° 2.02.
- El aditivo acelerante es el último que entra en contacto con el concreto fresco, recién una vez que el mismo haya sido mezclado y transportado con sus demás aditivos en el camión mixer, añadiéndose en la salida de la boquilla de la manguera en el momento del lanzamiento en la zona de trabajo. Este acelerante permite desarrollar una fragua rápida y una alta resistencia a corto plazo y exigiéndose que no tengan efectos corrosivos sobre el acero, ni propicien rajaduras o desprendimientos de concreto. El aditivo acelerante elegido fue el *Meyco SA160*.

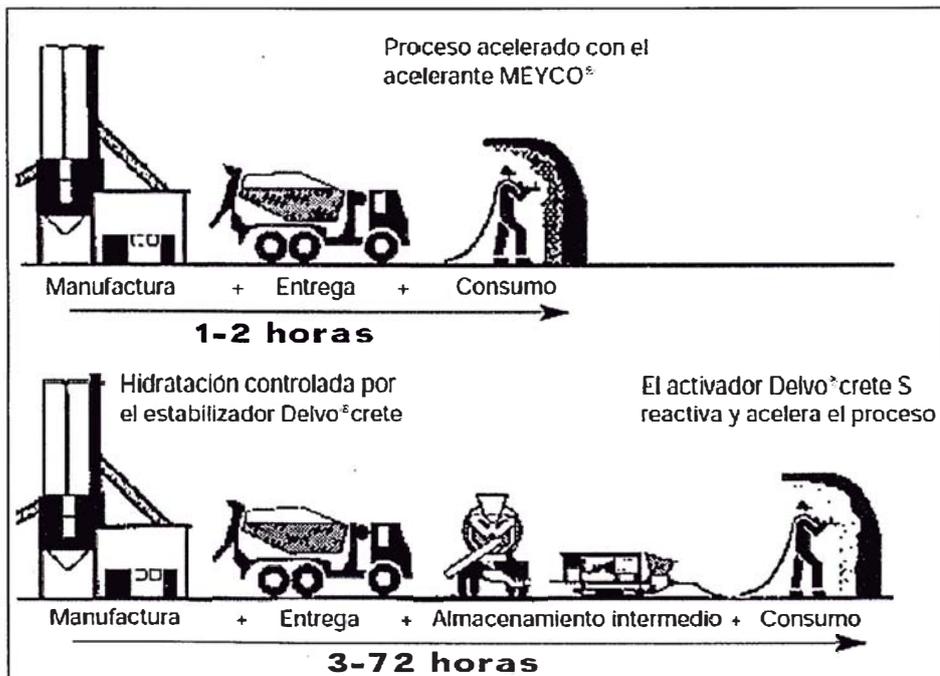


Figura N° 2.02: Efecto del aditivo para el control de hidratación.

Fuente: Alegre, Víctor. Conferencia diseño de concreto lanzado – Shotcrete, Lima 2014.

## 2.2 DISEÑO DE MEZCLA

Como fue de necesidad la producción de grandes volúmenes de concreto proyectado, el abastecimiento se realizó mediante concreto premezclado transportado con camiones mixer, y cuyos patrones de diseño obedece a lo descrito en las secciones anteriores. Así tenemos el siguiente diseño de mezcla del concreto proyectado que se empleó:

Cuadro N° 2.03: Dosificación de los componentes en estado seco.

COMPONENTES	PROCEDENCIA	ESPECIFICACIÓN	Shotcrete $f'c$ 280 kg/cm <sup>2</sup> , slump de 6" a 8"	UND
Agregado Fino	Cant. Jicamarca	ASTM C 33	1603	kg/m <sup>3</sup>
Cemento Tipo V	Cementos Lima	ASTM C 150	380	kg/m <sup>3</sup>
Filler	Cementos Lima	ASTM C 1157	67	kg/m <sup>3</sup>
Rheobuild 1000	Basf Perú	ASTM C 494 - Tipo A y F	6.26	lt/m <sup>3</sup>
Delvo Estabilizador	Basf Perú	ASTM C 494 - Tipo B y D	2.24	lt/m <sup>3</sup>
Agua	Red pública	NTP 339.088	203	lt/m <sup>3</sup>

Fuente: Información técnica del concreto premezclado shotcrete  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup> Unicón – Vía  
Expresa Línea Amarilla.

A esta mezcla se le añade el aditivo acelerante de fragua, cuya proporción fue adecuada al uso del cemento según recomendaciones del fabricante, y en este caso corresponde al porcentaje de peso del cemento (permitido entre 4 y 8%). Este acelerante inició la hidratación del concreto proyectado aproximadamente de 5 a 15 minutos después de su aplicación, por lo que el curado tuvo que realizarse de 15 a 30 minutos aproximadamente. Se optó por un acelerante libre de álcalis por ser amigable con el medio ambiente, y por no producir quemaduras al contacto con la piel, recomendable para concreto proyectado de altas resistencias.

## 2.3 EQUIPOS DE PROYECCION

Las máquinas de proyección por vía húmeda existentes hoy son de dos tipos: Flujo diluido y Flujo denso, (transporte por aire comprimido y transporte por bombeo respectivamente).

Dichas máquinas proporcionan unos elevados rendimientos, superiores en todos los casos a los ofrecidos por los equipos de vía seca.

El sistema más utilizado en la actualidad, y el que se aplicó para nuestro lanzado de concreto, es el método de proyección por vía húmeda y flujo denso. Dichas máquinas se limitan a un bombeo de la mezcla de concreto a través de mangueras especiales hasta una boquilla de proyección, en la que se incorpora el aire comprimido mediante una máquina compresora a una presión entre 6 kg/cm<sup>2</sup> y 8 kg/cm<sup>2</sup>, y el aditivo acelerante líquido de fraguado.

Con el empleo de este sistema de proyección, y los recientes desarrollos de aditivos superplastificantes, aditivos acelerantes, maquinaria, bombas dosificadoras, etc., se buscó conseguir un sistema de buenas prestaciones en cuanto a rendimientos, mínima formación de polvo y de rebote de proyección.

La máquina que se utilizó para lanzar concreto es la bomba "REED Serie A Rockmaster", que tiene un sistema hidráulico de Circuito Abierto y control para ciclos de estado sólido.



Figura N° 2.03: Bomba "REED Serie A Rockmaster".

Fuente: Fotografía del autor.

Algunas aplicaciones de su uso son el Concreto Lanzado, lechadas a presión, estabilización de taludes, rellenos, entre otros.

El dosificador se empleó para adicionar el aditivo acelerante. La cantidad dosificada se correlacionó con la cantidad del concreto; o sea, el dosificador estuvo sincronizado con el suministro de concreto y cubriendo el rango completo (Dosis mínima y máxima multiplicadas por el contenido de cemento en la cantidad de concreto proyectado suministrado).



Figura N° 2.04: Equipo de proyección del Concreto Lanzado.

Fuente: Fotografía del autor.

En el lado derecho de la Figura N° 2.04 se observa la máquina compresora inyectando aire comprimido en la boquilla de proyección, y en el centro de esta misma figura se muestra la bomba de concreto empleada.

## CAPITULO III: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

### 3.1 EXCAVACIÓN, CORTE Y PERFILADO DE TALUD

El vínculo entre el concreto proyectado y el terreno resulta efectivo solamente si la calidad de las dos superficies de contacto es buena, el alto contenido de cementante y la velocidad de impacto del lanzado, hace que el concreto proyectado tenga las condiciones apropiadas para un adecuado anclaje y una alta adherencia.

Cuando al concreto le correspondió hacer las veces de sustrato se hizo sobre él una superficie rugosa, lo cual se obtuvo con un acabado de concreto proyectado rústico. Las especificaciones indican que la superficie debe estar, además, libre de partículas con baja adhesión, y debe remojarse para prevenir que el área de adhesión se seque debido al efecto de absorción del concreto. Lo mismo aplicó en principio para las superficies recientemente excavadas, la fuerza de la operación de limpieza depende de la cohesión interna del sustrato y el requerimiento de agua se basó en la humedad inherente en la superficie de adhesión. En resumen, el sustrato debe estar siempre libre de polvo o de secciones sueltas, y se mantuvo húmedo de acuerdo con su capacidad de absorción.

Para optimizar las operaciones, la superficie se limpió con un compresor de aire desde la unidad de lanzado, luego se enjuagó y remojó con agua corriente mediante una cisterna. Esta tarea se realiza inmediatamente antes del lanzado para prevenir que se forme una capa aislante de polvo inmediatamente después. Se aplicó esto mismo para el concreto proyectado colocado capa por capa.

El corte del talud se hizo de acuerdo a las características del proyecto. La excavación comprendió los controles de lisura e inclinación del talud, y se profundizó una altura entre 2.00 a 2.50 metros según el nivel correspondiente indicado en los planos. A lo largo de una parte de los límites de excavación propuesta, se excavó el suelo con una máquina excavadora o equipo similar, mientras que el perfilado de los taludes se realizó con una retroexcavadora o de modo manual con herramientas menores convencionales. La longitud del tramo

cortado se realizó lo que se estima revestir con la primera capa de concreto lanzado en una jornada de trabajo, en este caso se realizaba cada 40 m, excepto en el primer nivel de anclajes, que permitía cortar longitudes mayores. La excavación fue determinada por los controles topográficos y el acabado de la superficie del talud.



**Figura N° 3.01: Excavación del primer nivel, profundidad 2.00 a 2.50 m, según indicaciones de los planos.**

Fuente: Fotografía del autor.

Aunque durante las fases constructivas se produjo un drenaje a través del propio tajo de la obra, se ha considerado que existen pérdidas del canal de desviación del lado izquierdo. Para que no se produzcan empujes mayores en el trasdós del concreto proyectado, se vio necesario la disposición de drenes de capa o barbacanas que permitan la salida del agua que puede llegar a las protecciones de los taludes. Estas barbacanas se ubicaron a cada 3 m espaciados horizontalmente, y en todos los niveles según las especificaciones técnicas del proyecto. Las mismas se formaron por tuberías perforadas en su longitud, y envueltas en geotextil para el paso y drenaje del agua a través de estos canales.

### **Especificaciones:**

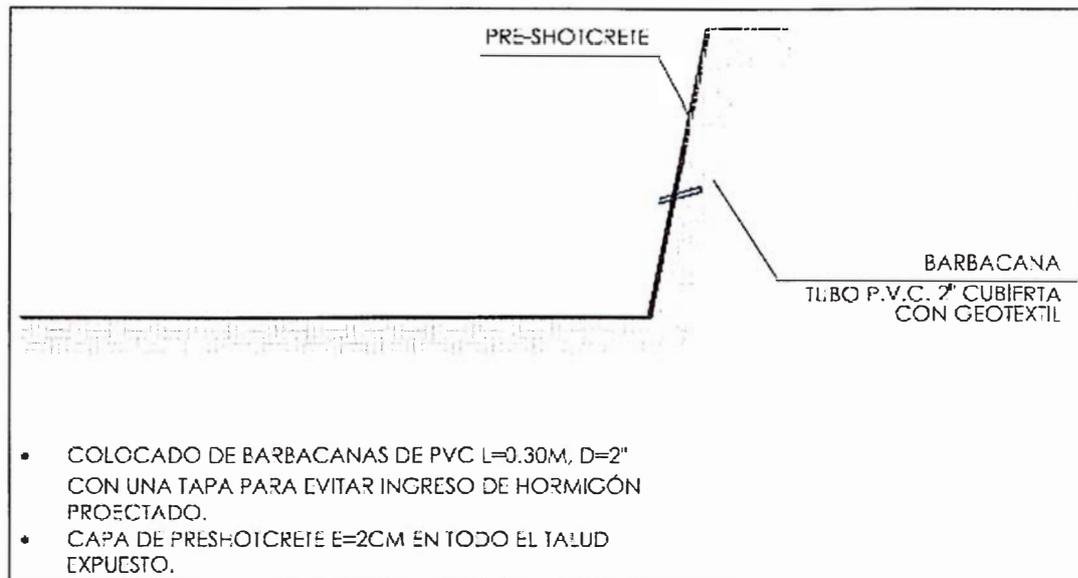
No podrá removerse el terreno adyacente a las estructuras más allá del límite especificado en los planos. La excavación de los taludes se realizará en conformidad con los requisitos geométricos indicados en los planos del proyecto, y de modo adecuado para no dañar su superficie final, evitar la descompresión prematura o excesiva de su pie y contrarrestar cualquier otra causa que pueda comprometer la estabilidad normal de la excavación final. Toda piedra suelta o material inestable deberá ser removida. La excavación incluye todo el transporte, retiro y disposición del material extraído.

Durante la ejecución de estos trabajos se deben efectuar los siguientes controles principales:

- Verificar el alineamiento, perfil y sección de las áreas excavadas.
- Medir los volúmenes de trabajo ejecutado.

### **3.2 CAPA PREVIA DE SHOTCRETE E=2CM, E INSTALACION DE PRIMERA FILA DE ANCLAJES**

El Concreto proyectado se aplicó mediante proceso húmedo como se estableció en el capítulo anterior. Al término de la excavación, corte, perfilado del talud y realizada las verificaciones, se procedió a la colocación de una capa previa o inicial de concreto proyectado, el cual llamamos shotcrete de prevención de espesor 2 cm, el cual nos ayudó a contrarrestar algún desmoronamiento significativo del talud durante los trabajos de perforación e instalación de los anclajes debido al constante golpeo y fuerza ejercida por el brazo de la máquina perforadora apoyada sobre el terreno a estabilizar.



**Figura N° 3.02: Esquema general de la ubicación y colocación de barbacanas.**

Fuente: Planos del túnel "Proceso constructivo" Vía Expresa Línea Amarilla.

Toda aplicación de concreto proyectado sobre un talud inclinado o vertical para el proyecto en mención se realizó de manera secuencial y en sentido ascendente (desde la zona inferior hasta la zona superior del talud). Esto es por motivos de iniciar la estabilización en la parte que presente mayor presión del terreno, que es proporcional a la profundidad.

La aplicación del concreto proyectado se describirá a detalle en la sección "3.4 *Shotcrete primera capa*" del presente Informe de Suficiencia.

Se procedió luego a la localización topográfica horizontal y vertical de los anclajes a instalar, marcando así la primera fila de anclajes pasivos y/o activos según lo propuesto en el diseño del proyecto.

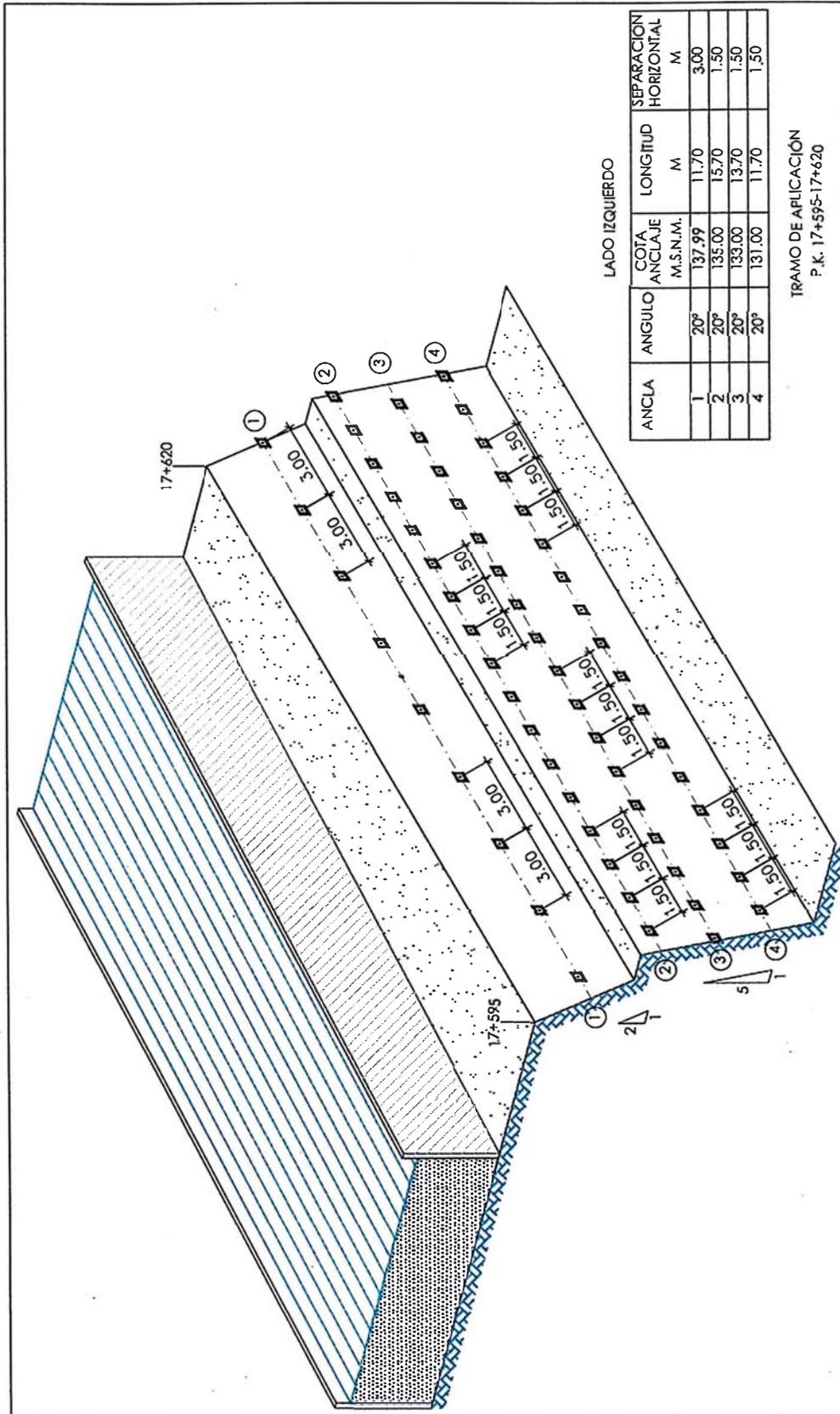


Figura N° 3.03: Isometría del talud a estabilizar mediante anclajes en el lado izquierdo (Progresiva 17+595 al 17+620).

Fuente: Planos del túnel "Estabilidad de taludes" Vía Expresa Línea Amarilla.

**3.2.1 Perforación:** Se realizó con equipos adecuados para perforar atravesando el tipo de suelo indicado en los estudios geotécnicos del proyecto, el agujero se realizó con un ángulo de 15 grados de inclinación para anclajes pasivos y 20 grados para los anclajes activos. Una de las funciones del ángulo (distinto a la finalidad de atravesar la superficie de falla del talud), es para que al momento de ser recubierto el anclaje, por efectos de gravedad se logre el llenado de lechada hasta el fondo del agujero.

El ángulo de inclinación se graduó en el brazo de la perforadora, y se permitieron validar según las especificaciones técnicas, variaciones de más menos tres grados ( $\pm 3^\circ$ ) sobre la inclinación teórica que se indican en los planos.



Figura N° 3.04: Perforación para el colocado de anclajes.

Fuente: Fotografía del autor.

**3.2.2 Anclajes pasivos:** Una vez marcada las ubicaciones de los anclajes por parte de la cuadrilla de topografía, se procedió a la instalación propia de los anclajes. Para los pasivos se utilizaron barras tipo DYWIDAG R51-660 o barras tipo TITAN 40/16 de la firma Ischebeck, con una carga en fluencia de 465 y 540

kN respectivamente, y a un límite de rotura de 660kN según las especificaciones técnicas. Asimismo, tienen la característica de ser autoperforantes.

La posición indicada en los Planos es orientativa, por lo que se pudo admitirse variaciones forzadas por la geometría de la obra o por interferencias dentro del talud, tales como presencia de bolonería o roca de gran tamaño no previsto en el estudio geotécnico que la máquina perforadora no logró atravesar. La tolerancia de estas variaciones barre un círculo con un radio de hasta 75 cm cuyo centro es la posición original del anclaje.

Los anclajes están compuestos por barras huecas con rosca externa continua en toda su longitud. La longitud de fabricación de estas barras es de 3.0 metros, y se empalmaron mediante manguitos roscados hembra-hembra, siendo siempre posible empalmar barras hasta alcanzar las longitudes totales deseadas, cortándose las barras cuando fueron necesario. La cabeza extrema del anclaje en la superficie del talud tiene una rosca de 15 cm de longitud, provista de una tuerca hexagonal.

En el proyecto tenemos desde longitudes a alcanzar desde 7.70 a 17.70 m.

La perforación con barras se realizaron por rotopercusión en cabeza, eligiéndose la broca de perforación según las condiciones del terreno. Además acompañó una lechada de agua-cemento, y una de sus funciones fue ser fluido de perforación, la cual se inyectó durante todo momento mientras se perforaba, retornando gran parte de la suspensión por el espacio anular que queda entre la barra y suelo.

El equipo mecánico de perforación permite una ejecución relativamente fácil de los taladros en cualquier posición y ángulo de ataque. El diámetro de la perforación fue de 115 mm para las barras tipo DYWIDAG R51-660, y de 70 mm para los del tipo TITAN 40/16. Una vez terminada la perforación, se limpiaron los agujeros con cuidado con aire comprimido.

Se distinguieron 2 etapas en la instalación de los anclajes, una de perforación que culmina cuando la misma ha alcanzado la longitud del proyecto, y otra de inyección. Para la etapa de perforación se empleó una mayor relación agua / cemento, siendo este de 0.90, y para la inyección final que servirá de recubrimiento y adherente del anclaje al terreno, le correspondió 0.45. Para

validar la relación agua / cemento durante la perforación se la realizaron de ensayos de carga de anclaje.

El cemento para la lechada utilizada es del tipo I según las especificaciones técnicas, y la resistencia final del cemento de inyección se especifica a 25MPa.

**3.2.3 Anclajes activos:** Son cables metálicos que anclados al terreno mediante un bulbo inyectado de agua-cemento, y por intermedio de una placa de reacción en su otro extremo se pusieron en tensión, actuando como elementos estabilizadores de la pantalla de sostenimiento. Son de tipo TERRA con cables de alta resistencia de  $D=0.6''$ , concretamente se emplearon anclajes de cable de tipo TERRA 6-3. Este cable de acero de 1500MPa de límite elástico y una resistencia a la tracción de 1770MPa, con 3 torones alcanza una carga en límite elástico de 705kN, y una carga máxima para Anclajes Permanentes superiores a los 390kN. La longitud total del anclaje es de 15.70 m, con un bulbo de 9.5 m de largo.

El diámetro de perforación mínimo exigido fue de 10.5 cm, mientras que el bulbo se conformó de una lechada de 25MPa de resistencia característica mínima, indicándose en las especificaciones inyectar a una presión no menor a 20 bares. La capacidad de arranque del bulbo para la longitud indicada de 15.70 m es de 290kN.

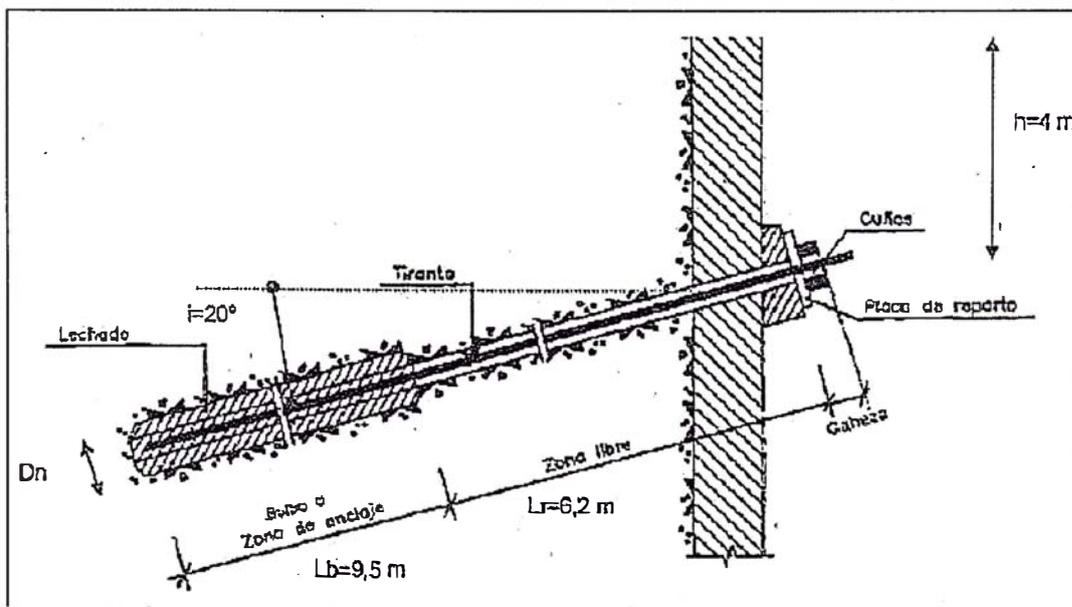


Figura N° 3.05: Esquema del anclaje activo.

Fuente: Planos del túnel "Estabilidad de taludes" Vía Expresa Línea Amarilla.

En este tipo de anclajes se distinguen dos zonas bien definidas a lo largo de su longitud: zona de anclaje rígido conformada por el bulbo; y zona libre o elástica la cual se protegió con lechada, y en el interior de la cubierta del cable se inyectó una grasa apropiada para permitir la deformación controlada logrando la carga de tensión de trabajo.

### **3.3 ARMADO Y COLOCACION DE LA PRIMERA CAPA DE REFUERZO**

Conforme a la pantalla de sostenimiento del proyecto, se colocaron dos capas de malla electrosoldada compuestas de barras de aceros corrugados que se cruzan en forma rectangular, estando las mismas soldadas en todas sus intersecciones. A diferencia de los sistemas tradicionales, estas mallas llegaron lista para ser instalada en obra.

La malla se colocó después de tener un tramo inicial de aproximadamente 25 m de longitud. Se introdujeron en el talud unas varillas de acero en los que se sujetó la malla de manera que se garantice el recubrimiento y se colocaron unos hilos sobre estos mismos para mantener la alineación y poder conservar el grosor requerido de la pantalla. Se colocó por partes, según el avance del corte del talud. El espacio entre el talud y las mallas de refuerzo es de 20 mm para shotcrete sin agregado grueso.

Cada unidad de malla empleada tiene una dimensión de 2.40 x 6.00 m, y su empalme fue de 0.30 m en ambas direcciones como mínimo formando un efecto trama. Cuando se recubren dos o más mallas de refuerzo, deben escalonarse permitiendo que puedan recubrirse sin ninguna interferencia.

También se colocaron los refuerzos adicionales correspondientes alrededor de todos los anclajes pasivos y/o activos, según indicaciones de los planos.

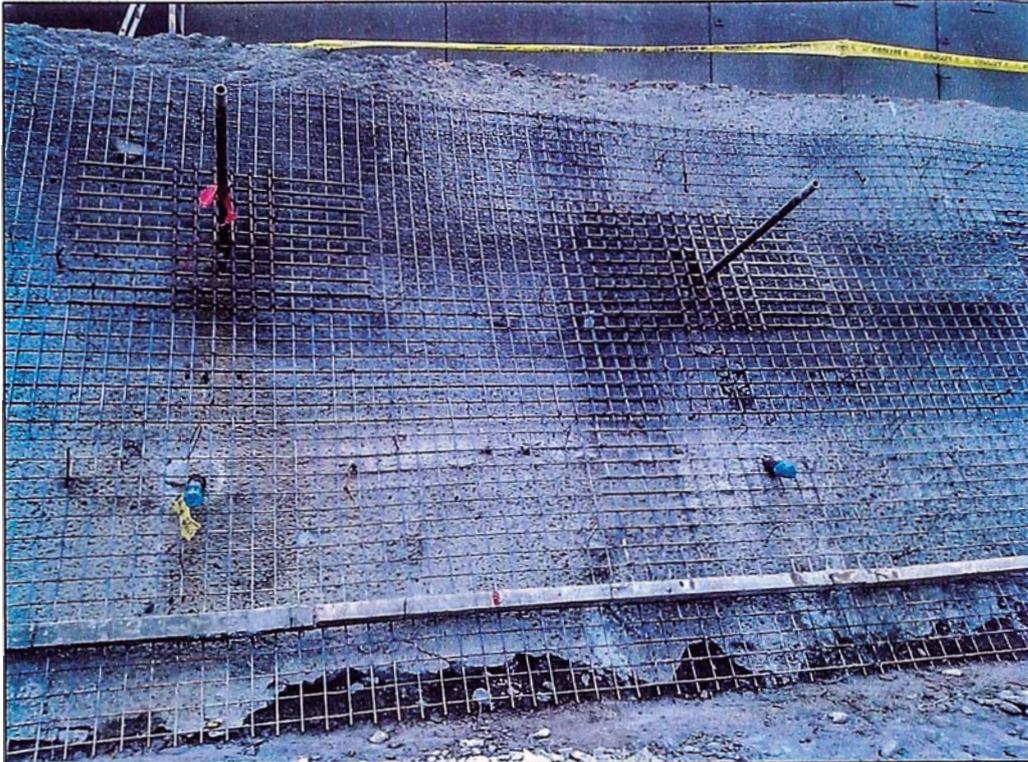


Figura N° 3.06: Armado y colocación de la 1ra. malla de refuerzo.

Fuente: Fotografía del autor.

### Especificación:

Las mallas electrosoldadas fabricadas deben cumplir las normas ASTM A-185 y ASTM A-497. Para el presente proyecto se emplean las soldadas tipo ACMA C503, siendo válido también sus similares en el mercado local, con las siguientes características:

- Distancia entre barras: 100mm (longitudinal y transversal)
- Diámetro de barras: 8 mm
- Sección de acero: 0,503 cm<sup>2</sup>/m
- Peso: 7,9 Kg/m<sup>2</sup>
- Tensión de fluencia: 500 MPa

No se aceptaron mallas electrosoldadas no identificadas o que presentaron oxidación excesiva, corrosión o algún otro defecto. Se almacenaron en forma ordenada y por encima del nivel del terreno, ya sea sobre plataformas, largueros u otros soportes adecuados, de manera que se encuentre protegido contra

daños mecánicos y deterioro superficial por efectos de la intemperie y ambientes corrosivos.

### 3.4 SHOTCRETE PRIMERA CAPA E=10CM

La pantalla de sostenimiento como ya se mencionó, se construyó en 2 capas estructurales, la primera de 10cm y la segunda corresponde a 5cm.

Una vez colocada la malla electrosoldada y el acero de refuerzo adicional en los anclajes, se procedió a la aplicación del concreto proyectado por vía húmeda.

#### 3.4.1 Evaluación del concreto en estado fresco:

El concreto empleado fue premezclado, cuyo diseño obedeció a lo definido en el capítulo II del presentê Informe de Suficiencia, cumpliendo también los requisitos de mezclado y entrega en obra reguladas por la norma ASTM C 94M o "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete".

Los primeros controles realizados al concreto en estado fresco fueron las medidas del asentamiento o "slump" y la temperatura.

El diseño de concreto menciona un slump 6" - 8" sin ser éste una restricción de máximo absoluto, por lo que son aceptables todos aquellos camiones mixer cuyo concreto se encontraba entre 4 ½" y 9 ½" llegado a obra y durante todo el proceso de lanzado. Esto obedece a la siguiente tabla indicada en la ASTM C 94M:

Cuadro N° 3.01: Tolerancias para asentamientos del concreto fresco cuyo requisito no sea "no exceder" o "máximo".

Asentamientos Nominales	
Asentamiento especificado de:	Tolerancia
2" (50 mm) y menor	± 1/2" (15 mm)
Más de 2" a 4" (50 mm a 100 mm)	± 1" (25 mm)
Más de 4" (100 mm)	± 1 ½" (40 mm)

Fuente: Norma técnica ASTM C 94M.

El concreto se dispuso dentro del rango admisible de asentamiento para un periodo de 30 minutos contados desde la llegada al frente de trabajo. En todo momento es fundamental la importancia de tener preparada previamente toda

estructura antes de concretar, para así no verse limitado por un posible asentamiento mínimo.

Si bien esta misma norma menciona que la descarga sea realizada dentro de 1 ½ horas después de introducir agua de amasado al cemento y agregados, se permite dejar de lado esta limitación cuando el concreto sea de un asentamiento tal que después de alcanzar este límite de tiempo, se pueda colocar o lanzar sin adición de agua extra.

Haciendo referencia a tal motivo expuesto, se controló que el tiempo de manipulación del concreto antes de ser proyectado sobre los taludes no excedan las 2 ½ horas establecidas por el fabricante del concreto, contados desde la salida de la planta mezcladora.

La temperatura del concreto lanzado fue monitoreada, no permitiendo el lanzamiento de concreto con temperaturas mayores a los 32° C, puesto que a mayores valores podrían causar dificultades como pérdida de asentamiento rápido o fragua instantánea. La temperatura mínima aplicable no fue menor a los 13° C establecidos en la siguiente tabla de la ASTM C 94M, para nuestra sección de la pantalla de sostenimiento menor a los 300mm:

**Tabla N° 3.02: Temperatura mínima aplicable según el tamaño de la sección.**

<b>Tamaño de la sección</b>	<b>Temperatura mín. °F (°C)</b>
< 12" (< 300 mm)	55 (13)
12" - 36" (300 mm - 900 mm)	50 (10)
36" - 72" (900 mm - 1800 mm)	45 (7)
> 72" (> 1800 mm)	40 (5)

Fuente: Norma técnica ASTM C 94M.

Todos estos parámetros descritos se registraron y controlaron para todos los camiones mixer, no permitiendo el uso de aquellos concretos fuera de los rangos establecidos.

### 3.4.2 Lanzado de concreto:

La colocación fue ejecutada por una máquina de propulsión de aire comprimido, equipado con un flexible de goma y con bomba estacionaria rociadora. En todo momento la presión del aire en la bomba no ha sido menor de 6 Kg/cm<sup>2</sup>.

Es previo al lanzado donde se añade el aditivo acelerante de fragua en la boquilla de la manguera, controlándose en función al peso del cemento. Este porcentaje lo define el proveedor o fabricante del aditivo, y en nuestro caso correspondió entre 4 y 8%, las cuales se regularon según los requerimientos de las condiciones de humedad de la superficie tratada. Cuando el talud perfilado presentaba una mayor humedad, el porcentaje de acelerante se aumentó buscando un efecto más rápido de la fragua del concreto.

Los enfoques diferentes para las diversas direcciones del Lanzado aplicado en la mayoría de las obras son los siguientes:

- *Al lanzar hacia abajo*, se pueden aplicar capas de cualquier grosor. Hay que asegurarse de que el rebote sea embebido o desechado para que no se quede sobre la superficie.
- *Al lanzar en la clave o hacia arriba*, el peso del material y la adherencia del concreto proyectado se anulan entre sí de manera que deben hacerse capas más delgadas.
- *Al lanzar horizontalmente*, como es nuestro caso, se fue alcanzando el espesor gradualmente en capas delgadas aplicado desde abajo hacia arriba. No se permitió el uso del material de rebote.

Durante el lanzado la capa de concreto proyectado se construyó haciendo varias pasadas de la boquilla de la manguera sobre un área preparada de la zona de trabajo. Las áreas se completaron en todo el espesor de la capa correspondiente a través de un flujo ininterrumpido, constante y uniforme; reduciendo así la posibilidad de generar juntas frías no permitidas.

La velocidad del concreto en el impacto es un factor importante en la determinación de sus propiedades finales y para embeber adecuadamente el acero de refuerzo. Para la mayoría de las aplicaciones en general, el ACI 506R-05 menciona que se lanzan a unas distancias entre 0.60 a 1.80 m medidos desde la cara de la superficie a la boquilla, siendo la velocidad de impacto un

poco menor que la velocidad del concreto en la boquilla. A distancias mayores a 1.80 m desde la boquilla, la velocidad de impacto puede ser considerablemente menor, pudiendo aumentar el rebote y la generación de polvo con lo que se reduciría la eficiencia de la aplicación, además de que la adherencia a la superficie y la compactación del concreto se pueda ver afectada.

Por tal motivo se controló la distancia de lanzado entre 0.60 y 1.50 m con el fin de cumplir los requisitos de la aplicación de concreto en este proyecto.

Como regla general la boquilla se mantuvo perpendicular a la superficie receptora, sobre todo para la etapa del concreto de prevención  $E=2\text{cm}$  sin malla electrosoldada ni acero de refuerzo. Para las capas que llevan acero de refuerzo se permitió una ligera inclinación para cubrir los vacíos detrás de la malla electrosoldada, pero nunca orientada en más de 45 grados a la superficie.

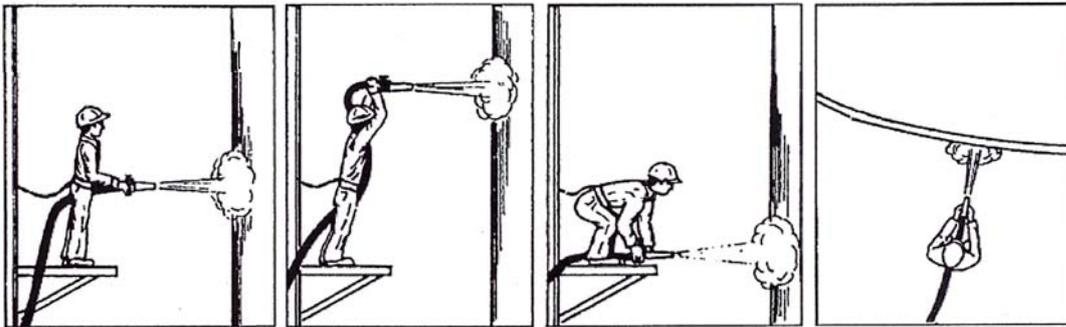


Figura N° 3.07: Correctas posiciones de lanzado, y en modo radial a la superficie.

Fuente: ACI 506R-05 "Guide to Shotcrete".



Figura N° 3.08: Lanzado horizontal y perpendicular al talud.

Fuente: Fotografía del autor.

Cuando la boquilla se mantiene en un ángulo demasiado grande, genera mayores cantidades de material de rebote, además de poder obtener un concreto proyectado poroso y no uniforme.

Para distribuir uniformemente el concreto, el operador dirigió la boquilla perpendicular a la superficie girando de manera constante en una serie de pequeños patrones ovales o circulares.

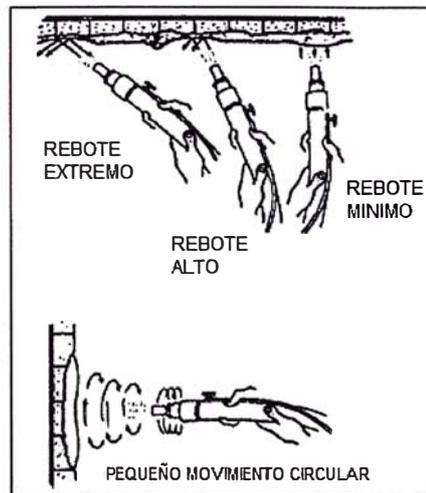


Figura N° 3.09: Manipulación de la boquilla para producir un concreto proyectado uniforme.

Fuente: ACI 506R-05 "Guide to Shotcrete".

No ha sido necesario trabajar un acabado especial, por lo que se permitieron irregularidades en la superficie.

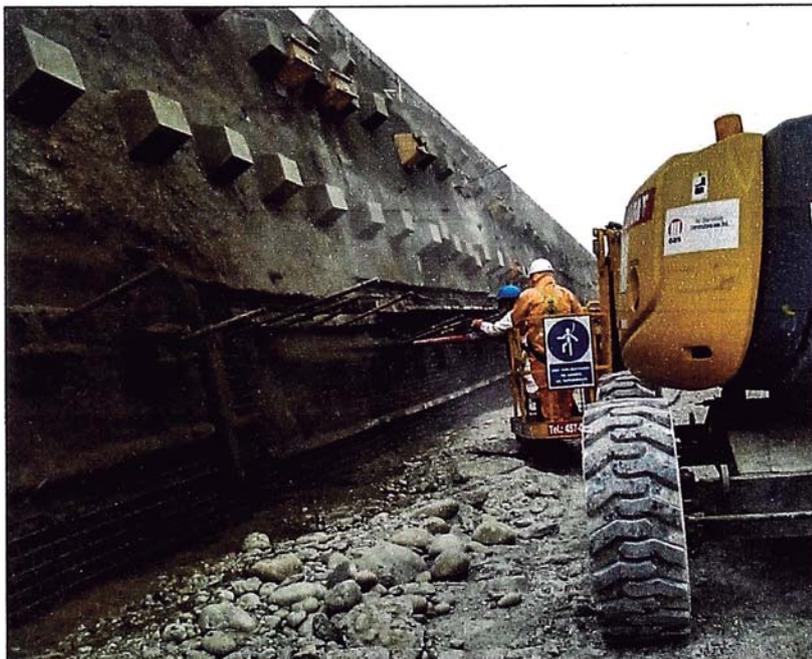


Figura N° 3.10: Lanzado de concreto primera capa.

Fuente: Fotografía del autor.

## **Especificación:**

### **a. Lanzado de concreto**

El material de rebote no deberá usarse nuevamente en la lanzadora.

El equipo debe estar limpio y seco y libre de material, si se produjera alguna obstrucción, esto se debería a los siguientes factores:

- Partículas demasiado grandes en la mezcla, capas endurecidas de cemento, pedazos de costales de cemento que penetran en la manguera.
- Arena muy húmeda.
- Arena muy seca.
- Agua que entra por las uniones de la manguera.
- Agua o aceite en el aire comprimido.

Al determinarse este tipo de causas se deben eliminar.

### **b. Juntas**

Se dejaron juntas a manera de cuñas de 30 cm. de ancho. La superficie inclinada del concreto lanzado se cepilló para quitar la nata y el material de rebote, dejando que fragüe.

El concreto no se corta o se aplasta. Antes de iniciar nuevamente la colocación del concreto se humedeció con un chorro de aire-agua. Toda la superficie inclinada se cubre con concreto lanzado fresco, y el espesor de la capa se empieza a formar de ahí en adelante.

### **c. Ensayos en estado endurecido**

Se ejecutaron ensayos a testigos diamantinos endurecidos, que se extrajeron de muestras de concreto lanzado recepcionados en paneles normados o bandejas trapezoidales denominadas artesas. Estas se ubicaron apoyados al talud momentos antes de realizarse el lanzado de concreto, de tal modo que refleje la realidad de las condiciones de compactación del concreto proyectado.

A las diamantinas extraídas se le ensayaron a la compresión uniaxial en los tiempos de 3, 7 y 28 días.

#### **d. Curado**

El concreto proyectado como el concreto convencional, debe ser curado correctamente para que su potencial de resistencia y durabilidad se desarrollen. El mejor método para el curado es mantener el concreto proyectado húmedo de forma continua durante 7 días manteniéndose una temperatura mayor a los 5° C según el ACI 506R-05. Por tal motivo, la capa previa lanzada E=2cm y la primera capa de shotcrete se curó por aspersion continua y uniforme de agua, utilizando camiones cisterna de agua para tal propósito, después de 20 minutos en promedio luego de terminada la aplicación del concreto lanzado.

Para la segunda capa se aplicó una membrana impermeabilizante para mantener la humedad dentro del concreto (regulada por la ASTM C 1315) buscando evitar el curado continuo por los días indicados, dando pase así a la excavación del siguiente nivel una vez asegurada la fila de anclajes. Esta membrana se trata de una emulsión líquida aplicada con un pulverizador (tipo mochila operada por una sola persona) sobre el concreto proyectado a una presión aproximada de 1 atmósfera, desarrollando una película impermeable y sellante de naturaleza micro cristalino, cerrando los poros superficiales del mismo. De esta manera se ofrece una protección contra la evaporación demasiado rápida debido a las acciones del sol y viento, muy aplicado para superficies verticales en distintos elementos estructurales de concreto.

### **3.5 COLOCACIÓN DE SEGUNDA CAPA DE REFUERZO Y SHOTCRETE SEGUNDA CAPA E=5CM**

Antes de continuar con las siguientes etapas constructivas, todo material suelto, irregular, o exceso fueron removidos por raspado u otros medios. Es aplicable también limpiar la superficie con un chorro de agua – aire. Se dejó la superficie anterior áspero y con mucha textura para mejorar la unión de esta segunda capa.

Una vez terminada la primera capa de refuerzo con el shotcrete se procedió a la colocación de la segunda malla, siguiendo las indicaciones de la primera parte. Adicional, se instaló un refuerzo adicional para las cabezas de todos los anclajes

(pasivos y activos) que actúan como base de soporte para la placa metálica, y que en conjunto soportan los esfuerzos de punzonamiento.



Figura N° 3.11: Armado del acero de refuerzo adicional en cabezales de anclajes.

Fuente: Fotografía del autor.

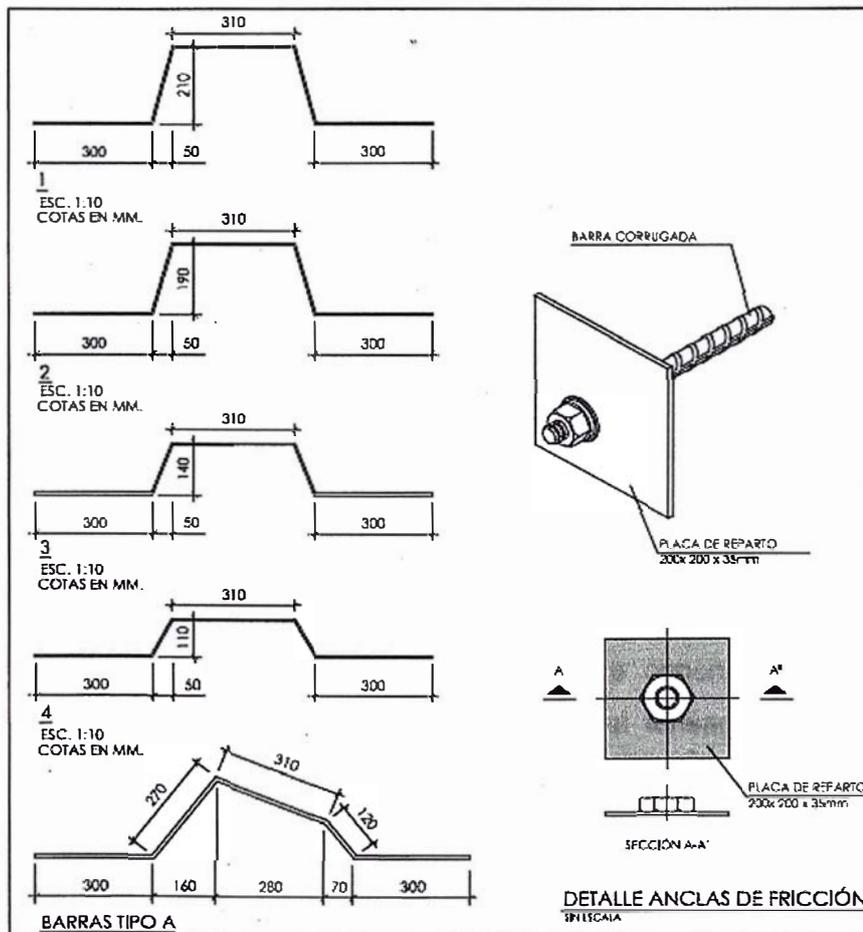


Figura N° 3.12: Despiece del acero y placa de reparto en cabezal de anclajes.

Fuente: Planos del túnel "Detalles estructurales" Vía Expresa Línea Amarilla.

Cuando se tuvo colocado todo el acero de refuerzo correspondiente, se procedió a encofrar las cabezas de los anclajes tal como se muestra en la Figura N° 3.13. Luego se colocó el concreto lanzado con las mismas indicaciones anteriores descritas en la primera capa. Las especificaciones indican una superficie final áspera pero con una rugosidad de una tolerancia de más o menos 5 mm. Finalmente, se vació las cabezas de los anclajes encofrados con el mismo concreto premezclado del shotcrete sin aditivo acelerante, formando así los dados de concreto con superficie uniforme donde se apoyará la placa de reparto de los anclajes y la tuerca.



Figura N° 3.13: Colocado de segunda capa de refuerzo.

Fuente: Fotografía del autor.

### 3.6 ASEGURADO DE ANCLAJES Y EJECUCIÓN DE LA SIGUIENTE FILA

Una vez terminado la colocación de las capas de concreto proyectado, se procede al asegurado de los anclajes pasivos y al tensado de los anclajes activos según corresponda, el cual se realizará aproximadamente 7 días después de su perforación, o hasta que la resistencia requerida de la lechada para los anclajes sea lo requerido (25Mpa).

El aseguramiento de los anclajes permite poder transmitir de forma distribuida la carga a la pantalla de sostenimiento de concreto lanzado. Esto se realiza

apoyado sobre la superficie uniforme presente en los dados de concreto moldeados para cubrir los cabezales de los anclajes que envuelven el segundo refuerzo adicional de la segunda capa de shotcrete.



Figura N° 3.14: Tensado de los anclajes activos con gata hidráulica.

Fuente: Fotografía del autor.

### Especificaciones:

La placa de reparto es de una dimensión de 0.20m x 0.20m y con un espesor de 35 mm, y están fabricadas según la norma ASTM-A-36. Se colocó esta placa de manera que quede centrada, y manteniendo un ángulo de 90 grados con el anclaje.

Para los anclajes activos, una vez que el bulbo conformado por la pasta endurecida de agua y cemento alcanzó la resistencia de 25 MPa, se procedió a tensarlos a una carga de diseño definida en el proyecto de 270 KN. Luego se procedió a colocar la tuerca y apretarla hasta asegurar adecuadamente el anclaje activo.

La ejecución de la siguiente fila de anclajes se procederá como lo descrito anteriormente, según se describe la Figura N° 3.15.

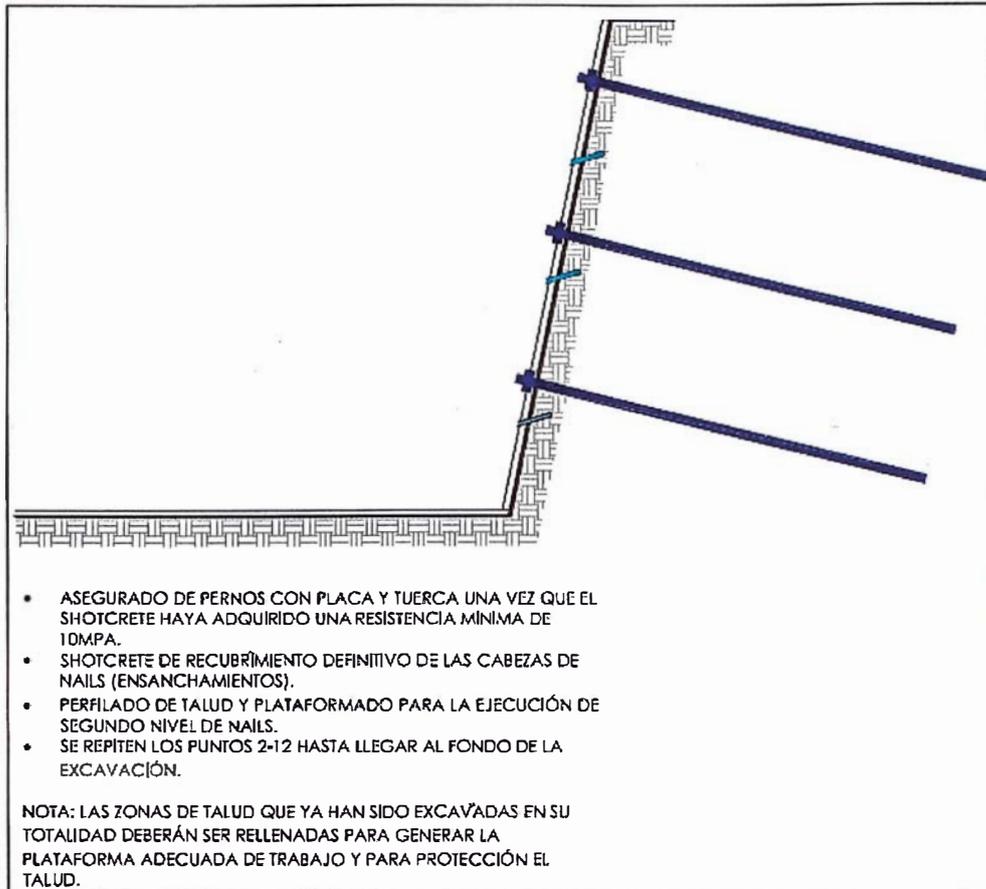


Figura N° 3.15: Secuencia constructiva de los siguientes niveles.

Fuente: Planos del túnel "Proceso constructivo" Vía Expresa Línea Amarilla.



Figura N°3.16: Excavación del siguiente nivel.

Fuente: Fotografía del autor.

### 3.7 METODOLOGÍA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

De los procedimientos constructivos detallados en los anteriores ítems, se deriva la siguiente metodología estándar de seguimiento y control del concreto proyectado aplicado a todos los taludes a estabilizar:

#### 1. OBJETIVO

El objetivo de la colocación proyectado es obtener concreto con una excelente compactación, resistencia acelerada, buena adherencia. Como cualquier método de construcción, el procedimiento de lanzado se encuentra sometido a ciertos principios y técnicas que se reflejan en la calidad del concreto colocado.

#### 2. SUMINISTROS NECESARIOS

##### 2.1. Materiales:

- Concreto para shotcrete
- Cemento
- Aditivos

##### 2.2. Equipos:

- Mallas de Refuerzo
- Equipo de impulsión (definido por tipo de aplicación)
- Compresora de aire
- Mangueras transportadoras de mezcla
- Cisterna de Concreto Mixer
- Grupo electrógeno
- Boquillas de salida
- Carretillas y/o buguies
- Ductos o chute para vaciar concreto.
- Andamio o grúa con brazos
- Bomba inyectora

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Condiciones iniciales para la ejecución de los trabajos:

Para el inicio de la proyección del concreto se tendrá que verificar:

- El personal a participar en el lanzado de concreto debe contar con todos los documentos técnicos (planos, especificaciones técnicas) en su versión vigente.
- La superficie debe estar debidamente afinada, perfilada y los elementos que quedan embebidos en el concreto proyectado (malla electrosoldada o barbacanas) deben estar debidamente asegurados para evitar un desprendimiento o movimiento durante la proyección del concreto.
- Preparar la superficie a concretar humedeciendo con agua. Se retira los restos de materiales sueltos, evitando la creación de falsas zonas que no adhieran al revestimiento posterior. La cantidad a humedecer depende de las cualidades de absorción del terreno.
- El personal encargado de la proyección de concreto debe tener la ficha técnica del equipo utilizado. En la ficha técnica deberá verificarse los siguientes datos:
  - o Presión de bombeo
  - o Caudal de concreto
  - o Distancia de proyección

#### 3.2. Ejecución del proceso

- La distancia de lanzamiento debe realizarse entre 0.6m a 1.5m, medidos desde la salida de la boquilla hasta la superficie de tratamiento. El lanzador debe estar en una posición segura y adecuada.
- Las capas para la aplicación del shotcrete dependen de los aditivos utilizados y de la composición final de shotcrete, para cada caso se debe tener en cuenta las diferentes especificaciones del proyecto y los planos, para la aplicación de las capas. Es permitida la formación de juntas frías entre capa y capa para la conformación de la estructura.
- La posición de la boquilla debe ser perpendicular a la superficie de tratamiento cuando la estructura a conformar no cuenta con malla

electrosoldada. Caso contrario la dirección de la boquilla debe ser ligeramente inclinada para cubrir los vacíos detrás de la malla electrosoldada. Considerar que menor inclinación reduce el desperdicio de concreto producto del rebote en la superficie de tratamiento.

- El operador debe empezar desde la zona inferior hacia arriba sobre áreas previamente definidas, lanzando el concreto en forma circular a la superficie con la finalidad de tener un buen acabado.
- Si se requiere un acabo especial, se debe proveer del personal adecuado que efectúe el trabajo antes del fraguado del concreto. De ser así, se debe disminuir la cantidad de aditivo acelerante de fragua para dar tiempo al personal de dar el acabado final.
- El material de rebote no se debe utilizar nuevamente como material de conformación.
- Los aditivos se emplean para mejorar las condiciones o características del concreto. Debe tomarse las muestras o testigo con la finalidad de verificar en laboratorio, que los aditivos usados no afectan las características finales del concreto. Debe evaluarse el tipo de aditivo acelerante a utilizar y esto dependerá básicamente del tiempo en que se desee alcanzar la resistencia.
- El curado de concreto proyectado se realiza con agua, se deberá mantener el curado con agua por 7 días o hasta instalar la siguiente capa de concreto. En la última capa de concreto se podrá aplicar una membrana química impermeabilizante.
- De ejecutarse un cambio de área de trabajo a mitad de un mixer de concreto, el operador deberá primero cerrar la llave con la cual se agrega aditivo acelerante de fragua al concreto y luego bombear todo el concreto que aun contenga la manguera. Terminado esto, se procederá a realizar el traslado de los equipos.
- Diariamente se completa el protocolo de **Control de colocación de concreto proyectado** (se adjunta en el Anexo G) con los datos del concreto utilizado, dimensiones del paño, capas de concreto colocadas, datos de la aplicación, etc.

### 3.3. Criterios de aceptación

- La presión del aire comprimido inyectado en la boquilla de proyección no debe ser menor a 6 kg/cm<sup>2</sup>. Se debe garantizar el slump de diseño.
- Supervisar la correcta aplicación del concreto proyectado, en cuanto a la elaboración y manejo de los agregados, así como la manufactura, transporte, colocación y curado.
- Comprobar que los materiales a utilizar cumplan los requisitos de calidad de acuerdo a las especificaciones de los materiales.
- Se debe tomar de manera cotidiana muestras de la mezcla elaborada para determinar su resistencia.
- Realizar medidas para determinar las dimensiones de la estructura y comprobar la uniformidad de la superficie.
- Se debe realizar los ensayos necesarios para el control de la mezcla y agregados. Así también, verificar las certificaciones de los aditivos que se utilizan, donde garanticen su calidad, disponiendo la ejecución de los ensayos de laboratorio para su verificación.
- Se toman las muestras por medio de recipientes o bandejas cada 20 m<sup>3</sup> para luego obtenerse 6 muestras cilíndricas. La resistencia a la compresión a los 28 días no debe ser inferior a 280 kg/cm<sup>2</sup>.

### 4. SEGURIDAD

- Equipos de protección personal (EPP) y las condiciones del medio ambiente adecuados.
- Iniciar los servicios después de realizar el reconocimiento de todos los riesgos y peligros que puedan sucintarse durante la realización de los trabajos.
- Los encargados de los servicios deben verificar constantemente las condiciones de las herramientas y equipos que se encuentren en un correcto estado de operatividad.
- Todo el acero de refuerzo con puntas salientes sobre el cual y en el cual los trabajadores pueden caer deberá ser resguardado con tapas para barras aprobadas para eliminar el riesgo de empalamiento.
- Se usara guantes apropiados para cada tarea, en ningún caso el personal debe colmatar sus uniformes, guantes o zapatos con concreto.

Los trabajadores que manipulen concreto y cemento deben tomar las medidas necesarias para impedir que la piel entre en contacto con el cemento o el concreto; además deberán lavarse con frecuencia y, si fuese necesario, utilizar una crema en las zonas expuestas.

El área de trabajo estará libre de todo elemento punzante (clavos, alambres, fierros, etc.) y de sustancias tales como grasas, aceites u otros, que puedan causar accidentes por deslizamiento.

## 5. MEDIO AMBIENTE

- Se debe de realizar las prácticas de medio ambiente referentes a residuos externos, aceites, grasas, papel, vasos desechables, restos metálicos, gases tóxicos.
- En caso de contaminación de suelo por concreto o acelerante libre de álcali, se retirará el residuo conjuntamente con la tierra contaminada y ambos serán tratados como material peligroso.

De darse mantenimiento a equipo que involucre algún tipo de combustible, hidrocarburos u otro derivado, se debe tomar las medidas adecuadas para contener un posible derrame (uso de bandejas anti derrame, paños anti derrame, booms, entre otros).

Utilizar surtidores de agua potable instalados en obra para la hidratación de los trabajadores.

## CAPITULO IV: EVALUACION DEL CONCRETO ENDURECIDO

La resistencia a la compresión del concreto se usa ampliamente para evaluar la calidad del concreto proyectado, siendo su propiedad más resaltante, puesta que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento fraguada. Muchos de los métodos para su muestreo y análisis son similares a los utilizados para el concreto convencional, y se pueden ser clasificadas en determinaciones destructivas y no destructivas. Debido a que en este caso no es posible moldear probetas estándar en estado fresco por la acción del acelerante de fragua, el muestreo del concreto proyectado se realizó en bandejas o paneles denominados artesas, tal como se describe en el ACI 506.2 y ASTM C 1140 que hacen referencia a la preparación y análisis de estas muestras de prueba.

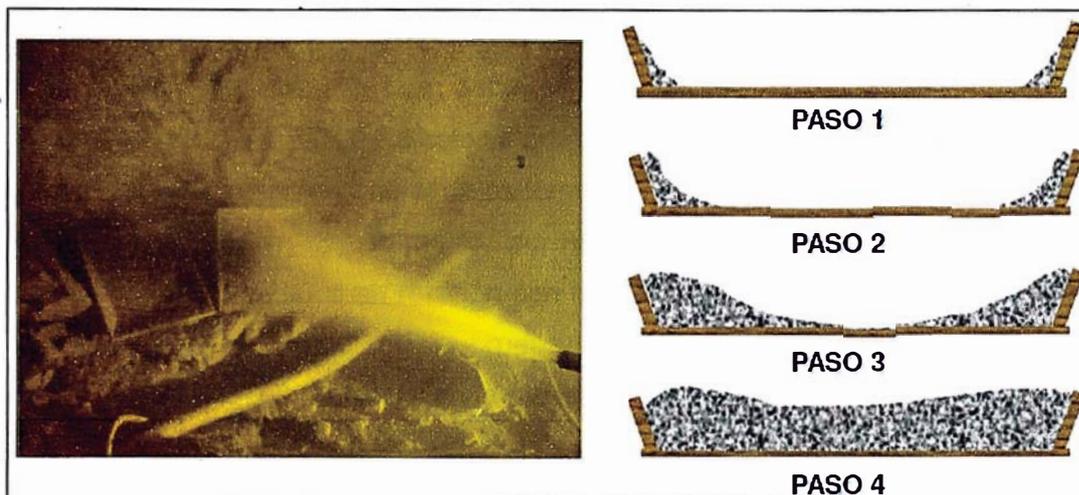


Figura N° 4.01: Gráfico ilustrativo de la toma de muestra de concreto lanzado.

Fuente: Alegre, Víctor. Conferencia diseño de concreto lanzado – Shotcrete, Lima 2014.

Los ensayos destructivos constan en llevar a la falla aquellas muestras diamantinas o núcleos extraídos de las artesas colocadas sobre los taludes a estabilizar, obteniendo así una muestra cilíndrica de concreto endurecido. Esta metodología es usada con mayor frecuencia, además de que nos es posible ofrecer una excelente oportunidad para examinar visualmente el concreto proyectado en su largo, su consolidación, el contacto con el terreno y otras posibles fallas, como pueden ser las siguientes:

- *El daño a las muestras y densidad:* Las grietas presentes en la diamantina pueden invalidar el resultado de la prueba. Cada 1 % de volumen de vacíos

en el concreto proyectado reducirá la resistencia a la compresión en aproximadamente 5 por ciento (Neville 1986).

- *Presencia de barras de refuerzo:* Es altamente deseable que las muestras no contengan barras de refuerzo. El acero de refuerzo embebido puede ser localizado usando un detector magnético; sin embargo, no existe un estándar establecido para tener en cuenta el efecto del acero de refuerzo en la resistencia de la muestra. No corresponde a este caso porque las muestras se tomaron sin presencia de acero.
- *La evidencia de la reacción álcali-agregado, los daños por congelación - descongelación, sulfato u otras acciones químicas:* Si hay dudas acerca de qué factores puedan causar daño aparente, se debe buscar asesoría de un especialista.

Aunque el ensayo de la resistencia a la compresión en sí es bastante simple, los detalles del procedimiento se deben establecer y seguir cuidadosamente. Numerosos factores pueden afectar a su resistencia que, a su vez, puede influir en el juicio de la calidad general de concreto proyectado. Algunos de los factores son las condiciones del diámetro, su relación altura-diámetro, dirección de extracción de los testigos en relación con la colocación del concreto proyectado, curado y humedad antes de la prueba, tamaño máximo del agregado y la presencia del acero de refuerzo en la muestra.



Figura N° 4.02: Extracción directa de las diamantinas de las bandejas tomadas en campo.

Fuente: Fotografía del autor.

Se muestreó a razón de una artesa cada 20 m<sup>3</sup> de concreto proyectado de acuerdo a las especificaciones del proyecto, extrayéndose un juego de 6 muestras diamantinas cilíndricas, para ser ensayadas a las edades de 3, 7 y 28 días. En el caso del concreto proyectado, la resistencia a compresión no debe ser inferior a 280 Kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

La resistencia a la compresión axial del concreto ( $f'c$ ) se calcula como sigue:

$$f'c = 4 \times P / (\pi \times d^2)$$

Donde:

$f'c$  = Resistencia a la compresión del concreto, en Kg-f / cm<sup>2</sup>.

P = Carga última del ensayo de compresión, en Kg-f.

d = Diámetro promedio de la probeta, en cm.

Las 6 muestras obtenidas en cada artesa se ensayaron en las siguientes cantidades: 02 diamantinas a 3 días, 02 diamantinas a 7 días y 02 diamantinas a los 28 días. Éstas se colocaron en la máquina de compresión y luego se le aplicó una carga gradualmente hasta su rotura.

#### 4.1 REQUISITOS DE ACEPTACION

La extracción, acondicionamiento y rotura de diamantinas cilíndricas de concreto se realizaron en base a la norma ASTM C-39. El curado de estas diamantinas se realizó en laboratorio mediante pozas de agua hasta que se les efectúe el ensayo.

El análisis de la evaluación y aceptación del concreto proyectado se realizó en base a la norma peruana E.060, mencionada en su numeral 5.6.3.

- Un ensayo de resistencia es el promedio de las resistencias de dos muestras cilíndricas confeccionadas de la misma muestra de concreto (artesa) y ensayadas a los 28 días.
- La resistencia será satisfactoria si cumple con los dos requisitos siguientes:
  - o Cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos es igual o superior a  $f'c$ .
  - o Ningún resultado individual del ensayo de resistencia (promedio de dos cilindros) es menor a  $f'c$  en más de 35 kg/cm<sup>2</sup> cuando  $f'c$  es de 350

kg/cm<sup>2</sup> o menor. En nuestro caso  $f'c = 280$  kg/cm<sup>2</sup> y ningún resultado individual será menor de 245 kg/cm<sup>2</sup>.

A continuación se muestran los ensayos a los 28 días, correspondientes a muestras tomadas durante un mes de trabajo de concreto proyectado:

**Cuadro N° 4.01: Ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días.**

IDENTIFICACION			ENSAYO COMPRESION ASTM C-39		RESISTENCIA PROMEDIO		PROMEDIO DE 3 ENSAYOS CONSECUTIVOS (Kg/cm <sup>2</sup> )
CODIGO DE MUESTREO (CAMPO)	FECHA MOLDEO	FECHA ROTURA	RESISTENCIA COMPRESIÓN CORREGIDA Kg/cm <sup>2</sup>	%	Kg/cm <sup>2</sup>	%	
				RESISTENCIA			
ART-082	3-oct-12	31-oct-12	329.9	117.8	335.3	119.8	
ART-082	3-oct-12	31-oct-12	340.7	121.7			
ART-083	3-oct-12	31-oct-12	340.0	121.4	336.0	120.0	
ART-083	3-oct-12	31-oct-12	332.0	118.6			
ART-084	4-oct-12	1-nov-12	378.0	135.0	380.6	135.9	350.6
ART-084	4-oct-12	1-nov-12	383.1	136.8			
ART-085	4-oct-12	1-nov-12	374.1	133.6	370.0	132.1	362.2
ART-085	4-oct-12	1-nov-12	365.8	130.6			
ART-086	5-oct-12	2-nov-12	409.9	146.4	409.9	146.4	386.8
ART-086	5-oct-12	2-nov-12	409.9	146.4			
ART-087	5-oct-12	2-nov-12	302.6	108.1	304.5	108.8	361.5
ART-087	5-oct-12	2-nov-12	306.4	109.4			
ART-088	5-oct-12	2-nov-12	349.8	124.9	348.1	124.3	354.2
ART-088	5-oct-12	2-nov-12	346.3	123.7			
ART-089	6-oct-12	3-nov-12	294.4	105.1	284.6	101.7	312.4
ART-089	6-oct-12	3-nov-12	274.9	98.2			
ART-090	6-oct-12	3-nov-12	340.7	121.7	343.8	122.8	325.5
ART-090	6-oct-12	3-nov-12	346.9	123.9			
ART-091	8-oct-12	5-nov-12	312.6	111.7	323.4	115.5	317.3

ART-091	8-oct-12	5-nov-12	334.1	119.3			
ART-092	9-oct-12	6-nov-12	350.7	125.3	356.2	127.2	341.1
ART-092	9-oct-12	6-nov-12	361.7	129.2			
ART-093	9-oct-12	6-nov-12	370.6	132.3	378.0	135.0	352.5
ART-093	9-oct-12	6-nov-12	385.4	137.7			
ART-094	10-oct-12	7-nov-12	317.4	113.4	318.9	113.9	351.0
ART-094	10-oct-12	7-nov-12	320.4	114.4			
ART-095	11-oct-12	8-nov-12	301.5	107.7	296.1	105.8	331.0
ART-095	11-oct-12	8-nov-12	290.8	103.9			
ART-096	12-oct-12	9-nov-12	364.8	130.3	360.1	128.6	325.0
ART-096	12-oct-12	9-nov-12	355.3	126.9			
ART-097	13-oct-12	10-nov-12	293.1	104.7	291.7	104.2	315.9
ART-097	13-oct-12	10-nov-12	290.2	103.6			
ART-098	13-oct-12	10-nov-12	304.8	108.9	308.0	110.0	319.9
ART-098	13-oct-12	10-nov-12	311.3	111.2			
ART-099	15-oct-12	12-nov-12	296.7	106.0	306.1	109.3	302.0
ART-099	15-oct-12	12-nov-12	315.6	112.7			
ART-100	16-oct-12	13-nov-12	349.1	124.7	345.5	123.4	319.9
ART-100	16-oct-12	13-nov-12	342.0	122.1			
ART-101	16-oct-12	13-nov-12	393.2	140.4	395.3	141.2	349.0
ART-101	16-oct-12	13-nov-12	397.3	141.9			
ART-102	17-oct-12	14-nov-12	344.1	122.9	354.5	126.6	365.1
ART-102	17-oct-12	14-nov-12	364.9	130.3			
ART-103	17-oct-12	14-nov-12	291.4	104.1	290.1	103.6	346.6
ART-103	17-oct-12	14-nov-12	288.8	103.1			
ART-104	18-oct-12	15-nov-12	358.0	127.8	351.6	125.6	332.0
ART-104	18-oct-12	15-nov-12	345.1	123.3			
ART-105	18-oct-12	15-nov-12	358.4	128.0	356.9	127.5	332.8
ART-105	18-oct-12	15-nov-12	355.4	126.9			

ART-106	19-oct-12	16-nov-12	431.9	154.2	425.7	152.0	378.1
ART-106	19-oct-12	16-nov-12	419.6	149.8			
ART-107	19-oct-12	16-nov-12	447.4	159.8	447.7	159.9	410.1
ART-107	19-oct-12	16-nov-12	448.0	160.0			
ART-108	20-oct-12	17-nov-12	315.0	112.5	310.7	111.0	394.7
ART-108	20-oct-12	17-nov-12	306.4	109.4			
ART-109	20-oct-12	17-nov-12	366.9	131.0	361.2	129.0	373.2
ART-109	20-oct-12	17-nov-12	355.6	127.0			
ART-110	22-oct-12	19-nov-12	427.9	152.8	431.1	154.0	367.7
ART-110	22-oct-12	19-nov-12	434.3	155.1			
ART-111	22-oct-12	19-nov-12	438.4	156.6	427.5	152.7	406.6
ART-111	22-oct-12	19-nov-12	416.6	148.8			
ART-112	23-oct-12	20-nov-12	466.8	166.7	489.3	174.7	449.3
ART-112	23-oct-12	20-nov-12	511.7	182.8			
ART-113	23-oct-12	20-nov-12	436.1	155.8	445.6	159.1	454.1
ART-113	23-oct-12	20-nov-12	455.0	162.5			
ART-114	24-oct-12	21-nov-12	479.0	171.1	484.1	172.9	473.0
ART-114	24-oct-12	21-nov-12	489.2	174.7			
ART-115	25-oct-12	22-nov-12	285.9	102.1	266.9	95.3	398.9
ART-115	25-oct-12	22-nov-12	248.0	88.6			
ART-116	25-oct-12	22-nov-12	351.2	125.4	345.6	123.4	365.5
ART-116	25-oct-12	22-nov-12	339.9	121.4			
ART-117	26-oct-12	23-nov-12	409.8	146.4	411.9	147.1	341.5
ART-117	26-oct-12	23-nov-12	414.0	147.9			
ART-118	26-oct-12	23-nov-12	447.2	159.7	442.6	158.1	400.0
ART-118	26-oct-12	23-nov-12	437.9	156.4			
ART-119	27-oct-12	24-nov-12	414.0	147.9	416.6	148.8	423.7
ART-119	27-oct-12	24-nov-12	419.1	149.7			
ART-120	29-oct-12	26-nov-12	327.0	116.8	328.7	117.4	396.0

ART-120	29-oct-12	26-nov-12	330.5	118.0			
ART-121	29-oct-12	26-nov-12	371.0	132.5	373.1	133.3	372.8
ART-121	29-oct-12	26-nov-12	375.2	134.0			
ART-122	30-oct-12	27-nov-12	399.8	142.8	401.5	143.4	367.8
ART-122	30-oct-12	27-nov-12	403.2	144.0			
ART-123	31-oct-12	28-nov-12	297.7	106.3	299.5	106.9	358.0
ART-123	31-oct-12	28-nov-12	301.2	107.6			
ART-124	31-oct-12	28-nov-12	311.6	111.3	308.2	110.1	336.4
ART-124	31-oct-12	28-nov-12	304.9	108.9			
ART-125	31-oct-12	28-nov-12	283.5	101.3	281.6	100.6	296.4
ART-125	31-oct-12	28-nov-12	279.6	99.9			

Fuente: Elaboración propia.

Así tenemos los siguientes resultados estadísticos:

**Cuadro N° 4.02: Resultados estadísticos.**

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA COMPRESIÓN Kg/cm <sup>2</sup>	% RESISTENCIA
<b>n</b>	<b>44.0</b>	<b>44.0</b>
<b>S</b>	15844.2	5658.6
<b>Xp</b>	<b>360.1</b>	<b>128.6</b>
<b>MIN</b>	266.9	95.3
<b>MAX</b>	489.3	174.7
<b>DESV. ESTÁNDAR</b>	56.6	20.2
<b>COEF. DE VARIACIÓN</b>	15.7	15.7

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

n = Cantidad de ensayos realizados (promedio de dos).

S = Suma algebraica de los "n" valores.

Xp = Resistencia a la compresión promedio.

MIN = Valor mínimo de resistencia a la compresión.

MAX = Valor máximo de resistencia a la compresión.

En los resultados del Cuadro N° 4.02 se muestra una considerable variabilidad reflejada en la desviación estándar de 56.6 Kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, en el Cuadro N° 4.01 se aprecia que los promedios aritméticos de tres ensayos consecutivos son mayores a  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ , y que ningún resultado es menor a 245 kg/cm<sup>2</sup>. En la Figura N° 4.03 se refleja gráficamente la variabilidad descrita.

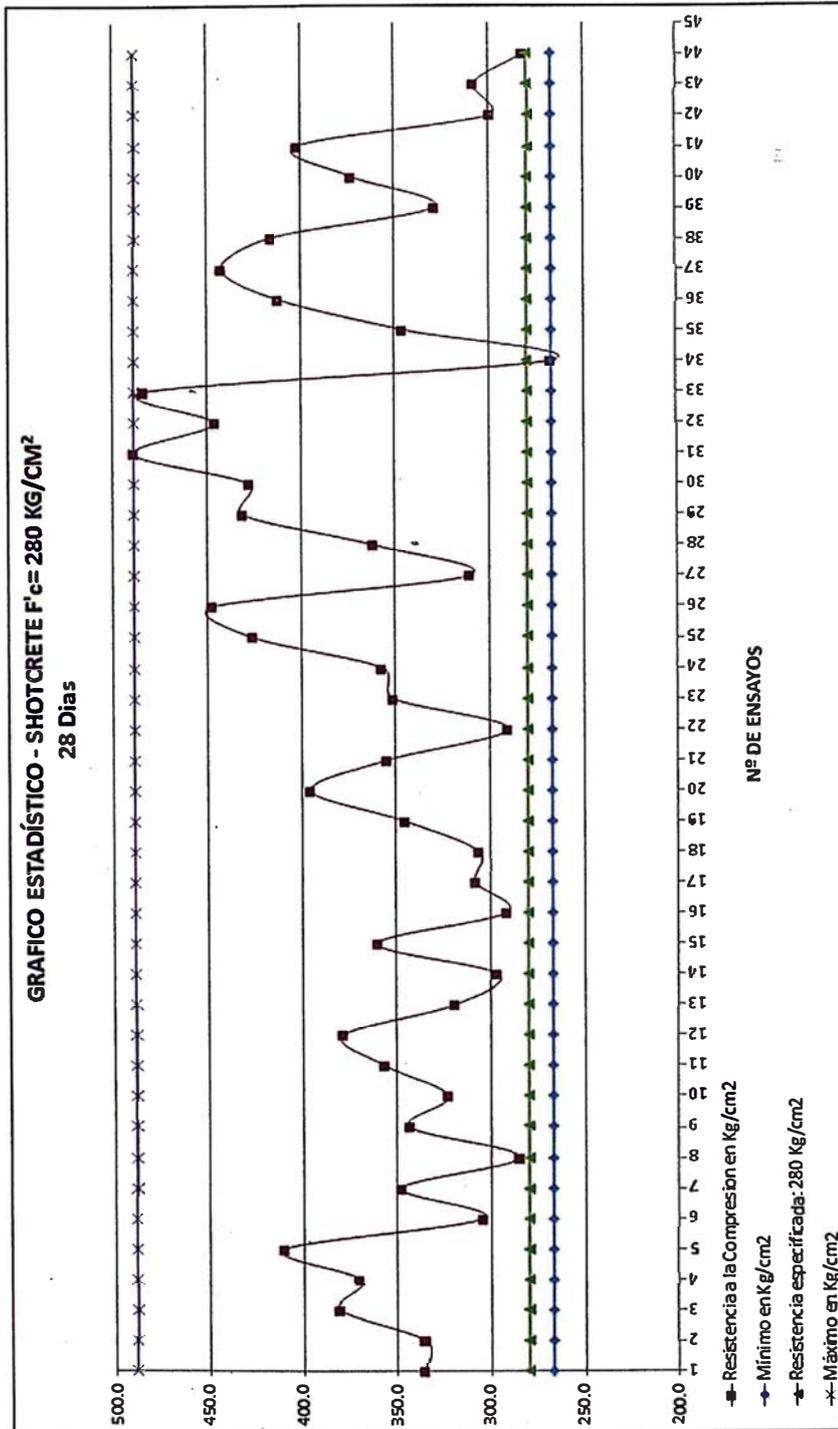


Figura N° 4.03: Gráfico estadístico a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- 1) De acuerdo al estudio realizado en campo y a requerimientos del proyecto, el proceso constructivo necesario para la estabilización de los taludes estableció lo siguiente:
  - a. El concreto lanzado se realizó por vía húmeda por su mayor eficiencia en la colocación, menor rebote y capacidad de producción a grandes volúmenes de concreto a lo largo de todos los taludes a estabilizar.
  - b. Para el diseño de mezcla: el cemento utilizado es el tipo V por su capacidad de mayor resistencia a los sulfatos y durabilidad, adicionalmente, se añadió filler calizo para mejorar algunas propiedades del concreto como aumentar la trabajabilidad, mejorar la resistencia al intemperismo, entre otros. El agregado está dentro de los límites de la gradación N° 01 de la Norma técnica ACI 506R cuya máxima dimensión es 10 mm, dado que mayores tamaños dificulta su colocado por la densidad de acero presente en la pantalla de sostenimiento.
  - c. Los aditivos empleados son: el superplastificante para lograr mayores asentamientos, el control de hidratación para mantener la trabajabilidad durante el tiempo de transporte del concreto premezclado a obra, y el acelerantes añadido (entre el 4% y 8% del peso de material cementante) en obra para lograr fraguado rápido.
  - d. La colocación del concreto proyectado se realizó en dos capas, permitiendo junta fría entre ambas. La primera de 10 cm cubriendo los aceros que aportan resistencia a la flexión y punzonamiento, y la segunda de 5 cm cubriendo la segunda malla electrosoldada. Antes de la aplicación de la siguiente capa, el concreto de la capa anterior debe haber terminado la fragua inicial, mas no necesariamente la fragua final.
  - e. La distancia de lanzamiento hacia la cara del talud comprendió entre 0.60 m y 1.50 m y la boquilla en todo momento posible perpendicular a la cara, excepto para rellenar zonas detrás del acero donde se permitió inclinaciones. El lanzado de concreto se realizó de abajo hacia arriba y moviendo la boquilla en forma circular para tener un acabado más uniforme.

- f. Los controles del concreto en estado fresco realizados fueron las pruebas de asentamiento (slump) y temperatura.
  - g. El curado del concreto proyectado en los taludes se realizó con agua aplicada por aspersión hasta por 7 días. En el caso de la última capa, se permitió el uso de membrana química impermeabilizante para evitar un curado prolongado.
- 2) La evaluación del concreto se realizó mediante muestras directas diamantinas cilíndricas obtenidas de bandejas normadas, tomadas en el proceso de lanzado. El curado de estas muestras se realizó en laboratorio mediante pozas de agua hasta que se les realice el ensayo de resistencia a la compresión.
  - 3) El personal participante en el lanzado de concreto debe tener experiencia probada.
  - 4) Los resultados de resistencia a la compresión del concreto proyectado a los 28 días presentan una considerable variabilidad, cuyo mínimo y máximo valor en porcentaje encontrados son 95.3% y 174.7% de  $f'c$  respectivamente; mientras que la desviación estándar muestra 56.6 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, éstos cumplen los requerimientos de las especificaciones del diseño de concreto del proyecto (280 kg/cm<sup>2</sup>) en base a la norma peruana E.060.
  - 5) La aplicación de las pautas indicadas en la norma técnica del ACI 506-R referidas al concreto proyectado, ASTM y la verificación de los resultados del mismo en base al Reglamento Nacional de Edificaciones E.060, permitieron desarrollar y ejecutar el proceso constructivo del concreto proyectado para la estabilización de los taludes, para la posterior construcción del túnel de concreto armado debajo del río Rímac, de manera adecuada para toda su longitud, siempre que se hayan cumplido además los parámetros indicados en las especificaciones técnicas del proyecto.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- 1) Un trabajo de lanzado de concreto requiere un proceso de actividades que deben ser cumplidos etapa por etapa para conseguir los resultados esperados.
- 2) Los materiales deben ser de calidad verificada, que cumplan con las especificaciones técnicas del proyecto y con las normativas vigentes afines.
- 3) Puesto que el concreto proyectado es un trabajo poco convencional, es importante realizar una selección adecuada del personal que lanzará el concreto, pues la eficiencia de su operatividad dependerá considerablemente de las buenas prácticas y experiencia del lanzador. Siempre que sea posible, realizar capacitaciones constantes al personal sobre estos trabajos.

## BIBLIOGRAFIA

- ACI 506R-05. "Guide to Shotcrete", 2005.
- ACI 506.2-95. "Specification to Shotcrete", 1995.
- Höfler, J. y Schlumpf, J. *Concreto proyectado en la construcción de túneles*. Edición N° 2. Madrid, 2004.
- Huambachano, J.C. "Revestimiento de un tramo de túnel con Concreto Lanzado". Informe de competencia profesional para optar el Título Profesional. FIC – UNI, Lima 2009.
- Pacco, J.C. "Procedimiento constructivo de muros anclados en paso a desnivel en el distrito de Ventanilla". Informe de Suficiencia para optar el Título profesional. FIC - UNI, Lima 2013.
- LAMSAC. "Especificación técnica particular, Secciones 08.01.03.07". derivado del EDI principal, Lima 2012.
- Rey, A., G. Pardo y R. Hurtado. *Túneles y Obras Subterráneas*. Ed. Sika, S.A.U. Madrid, 2010.