



CAPÍTULO 11.
REVESTIMIENTO DEFINITIVO Y ACABADOS



DIRECCIÓN GENERAL DE
SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 11. REVESTIMIENTO DEFINITIVO Y ACABADOS



Inauguración del túnel Salina Cruz. SCT. Marzo de 2012

11.1. INTRODUCCIÓN

Para el presente tema destacan por su importancia los túneles que se construyen actualmente en obras de carreteras en México; en estos proyectos, la conceptualización del acabado final, de acuerdo con sus funciones, adquiere especial interés. Muchas veces, el objetivo para el que son propuestos provoca discrepancias y plantea la disyuntiva de emplear soluciones estructurales o puramente estéticas y funcionales. Más aun, cuando se opta por una solución en la que se le da un carácter de elemento resistente, surge la discusión sobre su tipología (concreto colado in situ o concreto lanzado), sobre si requerirá ser reforzado y en caso afirmativo, cuál es el tipo de refuerzo más adecuado. Las respuestas a todos estos cuestionamientos casi nunca son directas.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, las técnicas convencionales modernas de construcción de túneles consideran el trabajo del sostenimiento, colocado durante la excavación, como la parte medular de la técnica para alcanzar la estabilidad total de la obra. Sólo bajo ciertas circunstancias se requerirá de un trabajo estructural adicional al que son capaces de realizar los sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento.

La concepción del acabado final de un túnel de carretera parte de la definición misma del sistema; es decir, si se le considera como una estructura que da soporte al terreno, a fin de preservar su estabilidad durante la operación del túnel, o si se le define como un elemento puramente funcional,

que mejora las condiciones de servicio (iluminación, de flujo de aire, etc.), y que constituye además un elemento estético de la obra. En medio de estos dos extremos existe un sinnúmero de factores que, aislados o en combinación de unos con otros, hacen imprescindible la implementación de procesos de toma de decisiones que conduzcan a soluciones seguras y económicas, y que a su vez doten a la obra de un nivel de calidad óptimo.

Los factores a los que se hace referencia pueden dividirse en dos grandes grupos: aquellos que impone el terreno y los que son propios de la funcionalidad de la obra. Dentro del grupo que corresponde al terreno, pueden mencionarse los siguientes:

- Geológicos: se relacionan con la litología (suelos, rocas y sus diferentes tipologías); la estructura (estratigrafía, naturaleza de las discontinuidades, estructuras geológicas mayores como fallas, plegamientos, etc.); la composición química del terreno (suelos o rocas expansivas, minerales agresivos para las estructuras, etc.); el tectonismo y la geohidrología del sitio.
- Topográficos: representan las condiciones de frontera de la obra y en muchas ocasiones determinan de manera muy importante las soluciones constructivas y estructurales; túneles urbanos con estructuras superficiales cercanas, túneles en montaña con terrenos accidentados o condiciones de superficie desfavorables, túneles profundos con problemas de grandes presiones de roca, etc.
- Geotécnicos: tiene relación con la resistencia de los materiales, su deformabilidad, los posibles modos de rotura (si son estructuralmente controlados o regidos por grandes deformaciones y/o esfuerzos); en roca, la naturaleza y las condiciones de las discontinuidades; en suelos, la permeabilidad, grado de saturación, consolidación (si es el caso), la propia consistencia (granulares, finos, etc.).

En cuanto a los factores relacionados con la funcionalidad de la obra pueden enumerarse los siguientes:

- Tipo de carretera: implica volumen de tránsito, dimensiones de la calzada, velocidad de proyecto, trazado, señalización, niveles de seguridad necesarios, etc.
- Instalaciones: por un lado están las electromecánicas (iluminación, ventilación, sistemas de control para seguridad, etc.) y por otro las de emergencia (incendio, telefonía, salidas y bahías de emergencia, etc.).

Entonces, a partir de todos los factores anteriormente descritos y sus posibles combinaciones, surge la pregunta sobre cómo definir un conjunto de criterios que contribuyan al diseño y la selección del tipo de acabado que mejor se adecua a un túnel en específico; siempre será necesario considerar y visualizar todos los elementos que impactan en su concepción a fin de llegar a la mejor opción y que ésta represente la seguridad y funcionalidad que se espera.

De lo anterior se desprende la variedad de tipos acabado final que hoy en día se emplean en túneles carreteros. Una de las tipologías más empleadas es la de revestimiento de concreto hidráulico, simple o armado (Figura 11.1). Sin embargo, en varias ocasiones también se elige la opción de utilizar concreto lanzado. Este último, a diferencia del de concreto hidráulico, genera desacuerdos por las condiciones visuales que presenta así como por otros factores que lo ponen en desventaja respecto a los elementos lisos. Precisamente se busca que el acabado final proporcione una eficiente operación y un fácil mantenimiento, así como una sensación de confort al conductor, seguridad y estética en el interior del túnel, lo anterior casi nunca resulta aceptable cuando se emplea concreto lanzado.

La Figura 11.1 muestra el interior de un túnel recientemente construido en la carretera Durango Mazatlán en la que puede verse un acabado agradable, mientras que en la foto de la Figura 11.2 se presenta un túnel, también de reciente construcción en el que el acabado deja mucho que desear.

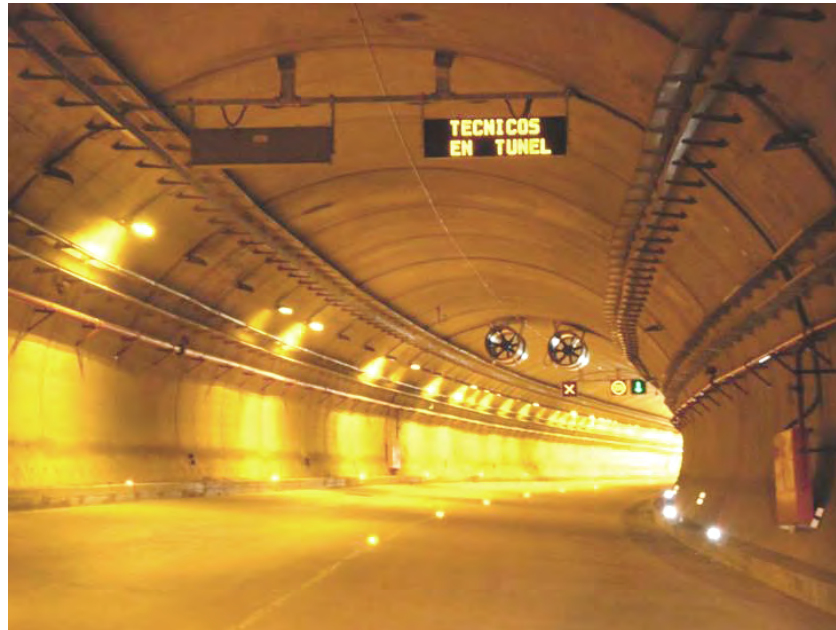


Figura 11.1. Túnel en la Carretera Durango-Mazatlán, México.



Figura 11.2. Concreto Lanzado como revestimiento. Túnel en la Supervía Poniente de la Ciudad de México.

El empleo de elementos prefabricados como las dovelas, no ha sido implementado en México en ningún túnel de carretera. Este tipo de solución sólo se ha empleado en túneles hidráulicos y en obra de metro.

Los túneles revestidos con dovelas, por las necesidades propias de los proyectos en los que se utilizan, se adaptan sólo a secciones circulares. En estos casos, el revestimiento se considera como el elemento de soporte más importante y se coloca casi inmediatamente después del avance de la excavación, mediante equipos especiales, generalmente tuneladoras; hoy en día, casi siempre se recurre a estos equipos cuando las longitudes por excavar son suficientes como para amortizar el costo del equipo.

No es descartable que en un futuro cercano se construyan los primero túneles de gran longitud en México en los que esta solución comience a ser atractiva.

Otra opción común son los paneles prefabricados, actualmente muy utilizados en varios países desarrollados. Estos elementos han resultado ser una buena opción al garantizar la funcionalidad y operación a largo plazo del túnel (iluminación, ventilación y mantenimiento, etc.); son colocados sin fines estructurales y por lo tanto, los sistemas de sostenimiento son los que deben garantizar la estabilidad de la excavación a largo plazo.

Un revestimiento podrá tener función estructural o no, dependiendo de las condiciones asumidas en el diseño; asimismo, éste puede ser completo en hastiales y bóveda (Figura 11.3), o parcial, solo abarcando parte de los hastiales, cuando se emplean paneles metálicos (Figura 11.4).



Figura 11.3. Revestimiento completo concreto hidráulico, Túnel Carretera Durango Mazatlán, México.



Figura 11.4. Revestimiento parcial con paneles prefabricados, Túnel Loma Larga Monterrey, México.

En casos de necesidad por acciones externas (presiones de roca fluyente, presiones de hinchamiento, fenómenos de consolidación u otras causas), los revestimientos llegan a ser continuos (cerrados) y en ocasiones herméticos (Figura 11.5).

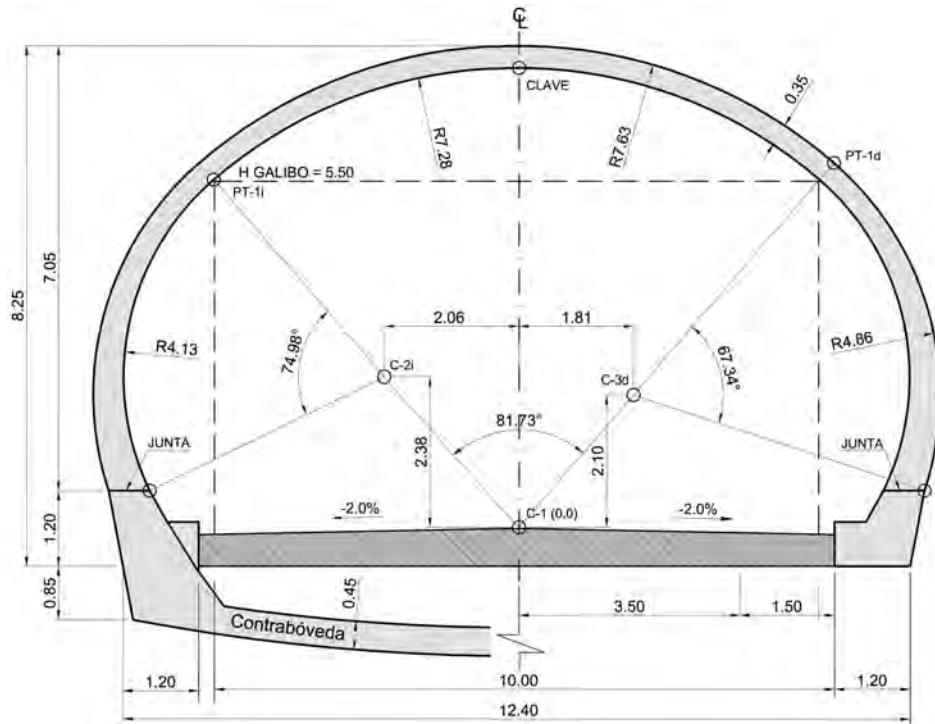


Figura 11.5. Sección típica de revestimiento. Lado izquierdo, cerrado con contrabóveda; lado derecho, abierto con zapatas. Túnel Xicotepec II, carretera México-Tuxpan, 2012 (Consultec).

Respecto a las metodologías de diseño de revestimientos, éstas dependerán de las hipótesis de carga que se asuman. Lo más común es considerar que, una vez concluida la excavación, ésta se encontrará en un estado de total estabilidad, lo cual se habrá logrado a través de los sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento colocados en el terreno. Entonces, la estructura del revestimiento únicamente cumplirá con fines de acabado y funcionalidad. Sin embargo, ante ciertas condiciones geotécnicas, hay ocasiones en las que se asumen solicitaciones de carga. En el Capítulo 9 de este Manual se hace una amplia disertación sobre este tema.

A partir de lo anteriormente descrito, en lo consecutivo se describirán los distintos tipos de acabados que pueden ser empleados en túneles carreteros:

- Revestimiento definitivo de concreto hidráulico simple o reforzado (con acero o con fibra)
- Revestimiento definitivo de concreto Lanzado simple o reforzado (con acero o con fibra)
- Elementos prefabricados (Dovelas)
- Paneles.

11.2. REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Para fines de esta sección, se hará referencia principalmente a aquellos túneles de carretera que se construyen en rocas o suelos mediante técnicas convencionales.

El revestimiento de un túnel puede concebirse a manera de un blindaje, como una barrera delimitadora de espacios o como el elemento funcional y estético que protege de forma permanente a una excavación subterránea; para cumplir cabalmente sus funciones, el revestimiento debe ser, antes que nada, sólido, compacto, impermeable, de espesor suficiente y con superficie interior tersa

y duradera, considerando que en la actualidad, en túneles carreteros es posible implementar el tipo de revestimiento de acuerdo con las características de los materiales que lo constituyen y con base en las necesidades del propio proyecto (Sánchez, 2014).

11.2.1. Criterios estructurales¹

Es un criterio más o menos generalizado que todo elemento estructural de concreto requiere que, al menos, un pequeño porcentaje de su área transversal sea sustituido por acero de refuerzo. Sin embargo, es un hecho también que en ingeniería civil se construyen miles de metros cúbicos de verdaderas estructuras sin acero, en las que se permite al concreto resistir esfuerzos moderados de tensión (tracción).

Para el diseño de algunos elementos estructurales, ciertos códigos suelen imponer el empleo de un “mínimo de acero de refuerzo” (secundario), el cual no se analiza y sólo se justifica destacando la eventual presencia de “esfuerzos por temperatura”; este refuerzo secundario se coloca casi siempre en dirección perpendicular al refuerzo principal. Sin embargo, para el refuerzo principal no se establece un límite mínimo.

Normalmente, quedan fuera de esta exigencia las estructuras constituidas por elementos cuya función estructural es evidente: trabes y columnas. Y muchas veces, la mayoría erróneamente, al revestimiento definitivo de un túnel se le dan atribuciones estructurales que nunca llega a desarrollar.

Por otro lado, una parte de las llamadas estructuras geotécnicas, es decir, aquellas cuya función estructural depende en gran medida de su interacción con el terreno que las aloja o las envuelve, suelen propiciar un comportamiento deformacional de naturaleza tridimensional y debieran diseñarse, para tal fin.

Mientras que, por una parte, los esfuerzos estructurales en un revestimiento suelen generarse por la acción de fuerzas externas y/o por los movimientos del medio en que se aloja, por otra, los cambios de volumen en el concreto, inducidos tanto por reacciones químicas, como por los efectos de las variaciones de temperatura y humedad en el ambiente, también inducen esfuerzos que, en ocasiones, alcanzan magnitudes considerables, así como una distribución impredecible,

En general, las estructuras geotécnicas que se desarrollan a lo largo de un eje (revestimientos), tienen una sección poco variable en planos transversales; en ellas, tradicionalmente, además del refuerzo primario, se ha impuesto el uso de un refuerzo secundario. Sin embargo, para definir su cuantía y disposición dentro de la masa del concreto, se requiere de un análisis tridimensional confiable; a falta de tal análisis, comúnmente se le ha dado un tratamiento de refuerzo secundario ligero “para armar” y “dar cuerpo”, pero sin un sustento técnico adecuado.

En algunos casos específicos podrá tener importancia diferenciar el refuerzo que se dispone para resistir los efectos de la temperatura en el concreto, de aquel que sólo tiene como función dar forma y cuerpo a los elementos estructurales y, con más razón, diferenciarlo del que se requiere para resistir los esfuerzos.

Se presentan casos en los que al emplearse el criterio de un mínimo de refuerzo secundario, en una determinada dirección, se obtiene una cantidad razonable de acero; así resulta en estructuras alargadas de considerable espesor, mientras que rinde resultados inaplicables a estructuras masivas: presas, bloques poliédricos, cilindros cortos y otras con dimensiones importantes en las 3 direcciones.

En el presente capítulo, es de gran interés tratar la diversidad de criterios de diseño a partir de los cuales, a lo largo de los últimos años de construcción de túneles en México, se han generado desacuerdos y que sin duda han sido responsables de la colocación de enormes cantidades de acero de refuerzo, virtualmente enterradas, por aplicar métodos de análisis bidimensional simplistas, totalmente inapropiados, o por emplear, sin base alguna, criterios de “refuerzo mínimo” o de refuerzo por temperatura.

¹ Los textos originales de esta sección corresponden con la Ref. [24].

Más aun, ciertas desviaciones en los criterios de los propios diseñadores, conducen a estructuras sobre-reforzadas, en las que, en la fase de construcción, llega a ser casi una proeza lograr que el concreto llene los vacíos que tienen asignados y que envuelva adecuadamente a las barras de refuerzo, nulificando de esta forma su función estructural.

No obstante lo anterior, en la práctica de la construcción de túneles, han llegado a presentarse algunas situaciones, aparentemente paradójicas, en las que, de no ser por la presencia del refuerzo secundario y a pesar de su no prevista acción estructural, durante episodios críticos de inestabilidades y derrumbes, dicho refuerzo ha contribuido a conservar en pie algunas partes estructurales vitales.

Estos casos afortunados animan a sugerir que, en sitios cruciales, seleccionados con criterio tridimensional, se aplique un criterio de refuerzo o Refuerzo para Eventos Contingentes (REC), que anticiparía la localización y el modo de ocurrencia de algún evento destructivo y permitiría adoptar medidas de reforzamiento especiales, lo que, visto desde otro ángulo, significa también que se aproveche y justifique el empleo del refuerzo secundario.

11.2.2. Concreto colado reforzado con varillas²

En esta sección, se hace referencia a las estructuras como el conjunto de elementos solido-resistentes que, por sí solos, o acoplados con otros elementos, propician el equilibrio y la permanencia de una obra de ingeniería (en este caso el revestimiento de un túnel), manteniéndola en equilibrio, impidiendo movimientos indeseados y evitando deformaciones excesivas o permanentes.

Asimismo, se hace referencia al refuerzo como el conjunto de barras de acero redondas, de superficie corrugada, con longitudes que van desde unos cuantos decímetros, hasta varios metros, que se alojan dentro de la masa del concreto, y a las que el cálculo estructural les asigna la función básica de resistir los esfuerzos de tensión, que el concreto, por sí solo, no es capaz de soportar.

Debido a la baja resistencia a la tensión y a la flexión del concreto se introduce el acero de refuerzo; otra cualidad del acero, como ya se dijo, es que permite controlar las deformaciones debidas a la temperatura y a la contracción (en algunos casos, poco frecuentes en túneles) puede utilizarse para presforzar el concreto. También suele ser útil para amarrar entre sí a otros refuerzos, para facilitar el colado o para resistir esfuerzos laterales.

La mayoría de los refuerzos son en forma de varillas o de alambres. Sus superficies pueden ser lisas o corrugadas. Las varillas corrugadas son de empleo más general, ya que producen mejor adherencia con el concreto. En el Capítulo 8 se describen con más detalle las consideraciones a tomar en cuenta cuando se utiliza acero de refuerzo como las varillas o la malla electrosoldada.

11.2.3. Concreto colado reforzado con fibra

En este caso, el concreto se refuerza con la incorporación de fibras. Las fibras son elementos fabricados de distintos materiales como acero, polímeros u otros materiales, sintéticos o naturales. Se usan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y tienen la ventaja de que, una vez incorporados a la mezcla, estos se orientan en múltiples direcciones. Las fibras actúan, de cierta manera, como la malla electrosoldada o las varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del concreto y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento.

Otro beneficio del Concreto Reforzado con Fibras (CRF) es el incremento de resistencia al impacto. Adicionalmente, controlan la fisuración durante la vida útil del elemento y brindan mayor resistencia a la fatiga. La más importante propiedad del concreto reforzado con fibras es la tenacidad (descrita como la capacidad de absorción de energía de un material), que se refleja en el concreto una vez que se han presentado fisuras, momento en que las fibras trabajan como refuerzo.

En el caso de fibras de acero, dependiendo del sistema de fabricación, se tienen diferentes tamaños, secciones, rugosidad superficial y formas (Tabla 11.1). Normalmente absorben deformaciones

² Los textos originales de esta sección corresponden con la Ref. [24].

a lo largo de la fibra o en sus extremos. Esta última modalidad es más eficaz para aumentar la adherencia en el concreto. Para comparar una fibra con otra se utilizan tres conceptos: relación de esbeltez, anclaje y resistencia a la tensión del alambre. Una forma fácil de comparar el desempeño de fibras, es revisando la relación de esbeltez (longitud/diámetro).

Ensayo	Nombre de la norma
Asentamiento	NTC 3696. Método de ensayo para determinar el tiempo de fluidez del concreto reforzado con fibras a través del cono de asentamiento invertido (ASTM 995).
Flexión	ASTM 1018 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam UIT Third-Point Loading). Esta norma fue derogada por ASTM (Norma Histórica).
Tenacidad	EFNARC-DE235. Método de ensayo para la determinación de la absorción de la energía (Tenacidad del concreto). Esta Norma está en evaluación por el ICONTEC.
Especificación	DE 097. Especificaciones para concretos convencionales y lanzados reforzados con fibras (Documento de referencia ASTM 1116). Esta Norma está en evaluación por el ICONTEC.
Tenacidad	ASTM 1550 (Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).
Resistencia residual	ASTM 1399 (Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete).
Flexión	ASTM 1609 (Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
Cantidad de fibras	JSCE N3 June 1984 Part III-2 Method of tests fo steel fiber reinforced concrete.
Resistencia al impacto	Para determinar la resistencia al impacto del concreto se realizaron dos tipos de ensayo: Método de Placa Impactada y Drop-weight Test (ACI-5442R-89)

Tabla 11.1. Principales Normas que evalúan las propiedades del concreto con fibras (IMCYC, 2008).

En la Tabla 11.1 se muestran las normativas que pueden ser empleadas de acuerdo con las características y condiciones a cumplir para un concreto reforzado con fibras. En múltiples y estudios pueden consultarse detalles referentes al comportamiento y tipos de las fibras comúnmente empleadas.

El uso de fibras de acero en el concreto para dotarlo de una respuesta adecuada antes y, sobre todo, después del agrietamiento ha ganado una importante popularidad en las últimas décadas. Su empleo ha demostrado ser satisfactorio pues se han mejorado las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los elementos estructurales formados por estas mezclas. Las ventajas más significativas de la adición de fibras de acero en el concreto, son las siguientes (Carrillo et al., 2013):

- Proveen de tenacidad a flexión (capacidad de absorber energía después del agrietamiento).
- Aumentan la resistencia a tensión directa, a cortante y a torsión.
- Incrementan las propiedades de resistencia al impacto y a la fatiga.
- Mejoran el comportamiento de contracción y flujo plástico.
- Incrementan la durabilidad en ciertas condiciones climáticas (ACI-544, 1996).

En el Capítulo 8 de este Manual se describen los tipos más comunes de fibras y sus correspondientes características y comportamiento cuando son empleadas como refuerzo del concreto.

11.2.4. Concreto colado sin acero de refuerzo³

El propósito de esta sección es dar soporte, con argumentos sólidos, de que la inmensa mayoría de los revestimientos de los túneles que se construyen para las obras de carreteras, no requieren acero de refuerzo para cumplir satisfactoriamente con el objetivo para el que fueron construidos.

Retomando lo citado en el Capítulo 9 (inciso 9.4.4.1), el Manual de túneles de carretera de los Estados Unidos recomienda que: “en todos los casos prácticos en los que sea posible, los revestimientos de concreto colado *in situ* deben diseñarse de simple”. Aun así, su diseño debe quedar debidamente justificado y soportado con todos los elementos que lo avalen.

El revestimiento de concreto simple colado *in situ* es una forma generalizada de soporte permanente en túneles, comúnmente empleado en terrenos firmes, rocas o suelos, en donde la excavación no se ve comprometida por condiciones de inestabilidad a largo plazo del terreno. Lo mismo que el concreto reforzado, al tratarse de una estructura colada mediante una cimbra (Figura 11.6), tiene la ventaja de poder ser diseñado para adaptarse a cualquier geometría que el túnel requiera; generalmente se diseñan específicamente para cada proyecto (o en conjunto para varios túneles de una misma carretera) y su geometría depende de la sección transversal, del trazado en planta y de otras particularidades de la obra. Cuando se construye un revestimiento de concreto colado *in situ*, este, además de ser un elemento estético y funcional, es un sello de inviolabilidad y una garantía de estabilidad permanente.



Figura 11.6. Algunas formas de moldes para colocación de revestimiento en túneles carreteros.

11.2.5. Concreto lanzado como revestimiento definitivo

El concreto lanzado es utilizado actualmente en obras subterráneas como parte del sostenimiento, tal y como se ha descrito en los Capítulos 8 y 9 de este Manual; sin embargo, también puede ser empleado como revestimiento definitivo si se aplican capas adicionales a las del sostenimiento.

Es importante diferenciar entre un revestimiento constituido por una verdadera estructura, la cual se define geométricamente en su intradós de manera exacta, formando superficies moldeadas y continuas, con espesores mínimos establecidos, controlados y verificados y un recubrimiento de concreto lanzado, el cual, aunque llegue a tener funciones estructurales (mediante un espesor considerable), siempre tendrá un acabado irregular y rugoso.

La ventaja que muchas veces se argumenta en el proceso de toma de decisiones sobre la tipología del revestimiento definitivo es que, a diferencia del concreto hidráulico, este no requiere de cimbras, con el consecuente ahorro en su fabricación y operación.

³ Los textos originales de esta sección corresponden con la Ref. [24].

El concreto lanzado, cuando se aplica en espesores importantes, puede tener propiedades muy similares a las del concreto convencional (resistencia, deformabilidad, durabilidad, etc.) y puede ser puesto en casi cualquier condición y forma. Sin embargo, también es un material con una baja resistencia a la tensión, que comporta como un material frágil una vez que adquiere resistencia por lo que, si se le van a dar atribuciones estructurales, debe ser reforzado apropiadamente mediante fibras o malla electrosoldada; el empleo de armados de varilla no es común en estos casos principalmente por el “efecto sombra” que produce (Ver Capítulo 8).

Un problema adicional que presentan los revestimientos de concreto lanzado es que el proceso de colocación se dificulta cuando este se realiza sobre la geomembrana de PVC (que forma parte del sistema de impermeabilización). Debido a que dicha geomembrana es de textura muy lisa, el concreto no se adhiere si se proyecta simplemente sobre ésta. Para conseguir su adherencia es necesario colocar malla electrosoldada, sujeta mediante piezas espaciales comúnmente llamadas “arañas” (Figura 11.7); estas piezas se anclan al concreto lanzado del sostenimiento y atraviesan el geotextil drenante y la geomembrana, por lo que una vez terminada la instalación de todo el sistema, la geomembrana debe ser vulcanizada perfectamente para que cumpla su función impermeabilizante. Una vez sujeta la malla, el lanzado debe aplicarse en capas delgadas para evitar que se desprege por su peso propio. La primera capa no puede llevar fibras de acero ya que éstas rasgarían la geomembrana. En la Figura 11.8 puede apreciarse el aspecto de la primera capa de concreto lanzado.

Por lo general la primera capa cuesta mucho de colocar y el rebote del concreto lanzado alcanza hasta el 50%, lo cual significa una pérdida económica muy importante; una vez que comienza a adherirse no es poco común que se desprendan algunas zonas, separando la malla, por lo que ésta debe de anclarse nuevamente (Figura 11.9).

Todo este proceso tiene un sobrecosto muy importante que debe sopesarse con el costo total de colocar un revestimiento de concreto colado in situ. Y si no se emplea el sistema de impermeabilización mediante geotextil, geomembrana y drenes longitudinales por detrás de la esquina de la zapata del revestimiento y se recurre al sistema antiguo de dejar que los drenes radiales descarguen dentro del túnel, es una garantía que al cabo de poco tiempo, el concreto del revestimiento acabará manchado y deteriorado dando un aspecto muy desagradable (Figura 11.10).



Figura 11.7. Sujeción de la malla electrosoldada mediante “arañas”. Túnel Chimalpa I. Carretera Toluca-Naucalpan. Consultec Ingenieros Asociados, 2015.



Figura 11.8. Primeras capas de lanzado sobre la geomembrana. Túnel Chimalpa I. Carretera Toluca-Naucalpan. Consultec Ingenieros Asociados, 2015.

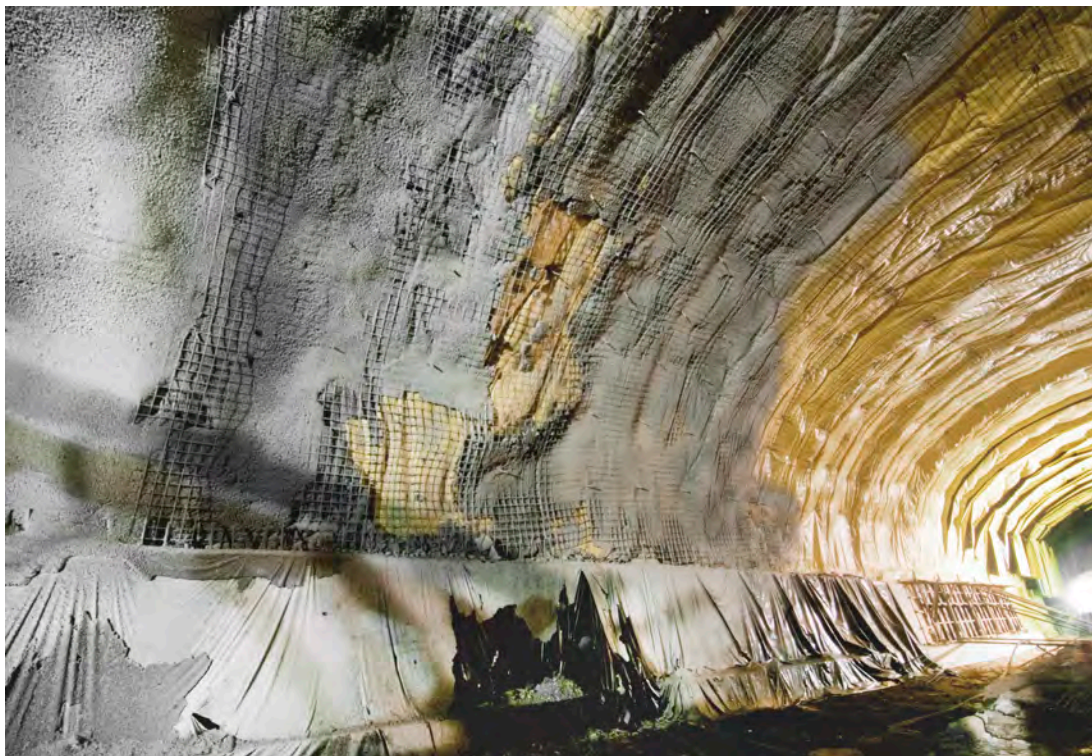


Figura 11.9. Zona de desprendimiento de la primera capa de concreto lanzado y separación de la malla. Túnel Chimalpa I. Carretera Toluca-Naucalpan. Consultec Ingenieros Asociados, 2015.



Figura 11.10. Túnel revestido con concreto lanzado sin un sistema de drenaje adecuado. Túnel la Loma, Supervía Poniente, Ciudad de México.

11.2.6. Elementos prefabricados (Dovelas)

En algunos países se han construido túneles largos de carretera empleando máquinas tuneladoras y revistiendo la excavación con dovelas; las dovelas son elementos prefabricados de concreto reforzado.

Las dovelas son elementos que en conjunto forman anillos (Figura 11.11), los anillos están conformados por el mismo número de piezas, generalmente entre cinco y ocho, más una dovela llave, cuña, o de cierre. Estos elementos se colocan simultáneamente durante el avance de la *tuneladora*, o en ciclos de excavación (avance) y paro para su colocación, permitiendo la estabilización total de la excavación durante toda la obra. Además, estos elementos permiten el apoyo de la *tuneladora* en su parte trasera (Figura 11.11), necesario para el proceso de excavación y estabilidad del frente.

Los anillos están dispuestos de manera yuxtapuesta y pueden ser rectos o troncocónicos. Los anillos rectos son de ancho constante y están limitados por planos paralelos entre ellos y perpendiculares al eje del túnel; únicamente pueden utilizarse para la construcción de tramos rectos. Los anillos troncocónicos se caracterizan por estar limitados por planos no paralelos entre ellos, permiten, según el orden de colocación, seguir curvas en plano o en perfil, o corregir desviaciones accidentales de un trazo y también construir tramos rectos (López et al., 2003).

El ancho medio de los anillos (medido en el sentido longitudinal del túnel) depende principalmente del diámetro del túnel y del radio de las curvas de la línea de trazo. El ancho de la dovela es variable, estando comprendida entre 1,0 y 1,70 m, el peso de cada dovela determinará la capacidad del elemento erector del escudo, con el que son colocadas durante la construcción del túnel (López et al., 2003).

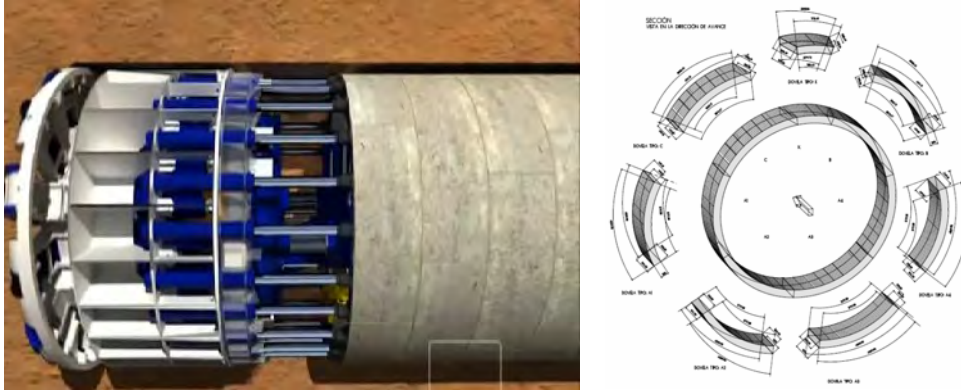


Figura 11.11. Anillos dovelados.

El encaje perfecto de todas las dovelas que forman el anillo de revestimiento se consigue con un elemento final denominado dovela llave, clave o de cierre; puede ser dovela llave longitudinal, tiene la forma de trapecio cilíndrico que se coloca longitudinalmente, o dovela llave radial, que puede ser introducida radialmente. Se necesita únicamente un pequeño espacio para su colocación, ya sea en la clave, cubeta, hastiales o donde se requiera, según el trazo del túnel y conforme lo especifique el equipo excavador. En todos los casos, las dovelas vecinas colocadas en cada lado de la clave son moldeadas exactamente con la forma de la llave, llamadas dovelas de contra-llave. Generalmente un anillo dovelado está compuesto por un número de dovelas idéntico, o diferentes en el caso de anillos oblicuos, dovelas normales estándar, dos dovelas contra llave y una llave o de cierre. Estos anillos van cambiando su posición conforme lo establezca el equipo excavador y la línea del túnel (López et al., 2003).

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Por otra parte, las dovelas requieren además la presencia de una armadura interior con el objeto de soportar los esfuerzos debidos tanto a su manipulación como a las cargas del terreno (López et al., 2003).

Para la formación del anillo de revestimiento se pueden colocar las dovelas de dos modos:

- El primero de ellos es el más utilizado, ya que se adapta perfectamente a cualquier tipo de terreno. Consiste en el montaje del anillo de dovelas al abrigo de la coraza del escudo, extrayéndose éstas a medida que avanza el escudo. El hueco que queda entre el extradós del anillo y el terreno será rellenado posteriormente con inyección.
- Anillos que se montan fuera del abrigo del escudo y que se expanden contra el terreno (revestimientos expandidos). Estos revestimientos solamente pueden aplicarse en aquellos terrenos con cortes muy regulares, sin posibilidad de presencia de huecos o desprendimientos que podrían dañar la estructura del anillo e incluso influir en la seguridad del túnel.

Para la unión entre las juntas comprendidas entre dovelas (juntas radiales) y entre anillos (juntas circunferenciales), se emplean tornillos de acero que se insertan en los rebajes y que pueden ser lisos, curvos y con tirafondo⁴. En el caso donde no se precisan tornillos de este tipo son las dovelas hexagonales y las dovelas expandidas, por su geometría y su filosofía de colocación, respectivamente.

Al igual que los anteriores revestimientos, se debe garantizar la estanqueidad del túnel mediante la colocación en las juntas de la dovela unas bandas o tiras de impermeabilización (impermeabilización primaria). Inyectando una lechada de concreto en el espacio que queda entre el terreno y el anillo de dovelas construido (impermeabilización secundaria) o construyendo un “segundo revestimiento” interior de concreto (impermeabilización terciaria), (López et al., 2003).

⁴ Es un tornillo afilado dotado de una cabeza diseñada para imprimirle un giro con la ayuda de una llave fija, destornillador, llave Allen: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/ope_tirafondo.htm.

En el mercado existe una variedad de equipos de excavación tanto para suelos como para roca, como *tuneladoras* abiertas, de escudo simple, o doble escudo y las EPB particularmente en terrenos blandos, *tuneladoras* para frentes mixtos, etc. En el Capítulo 7 de este Manual se presenta una amplia descripción de estos equipos.

11.2.7. Paneles

Otro tipo de elementos que actualmente pueden ser empleados para dar el acabado final, pero sin ningún fin estructural, son los llamados paneles (Figura 11.12); su principal objetivo es dotar de estética, proyección eficiente de la iluminación y mejorar en la ventilación dentro del túnel.



Figura 11.12. Colocación de paneles en clave y hastiales. Tomada de Alliance [Ref. 3].

Los paneles proporcionan una superficie uniforme que mejora el aspecto interior del túnel permitiendo un mantenimiento sencillo; dan un acabado agradable y conforme con las necesidades requeridas de funcionalidad. Se fabrican con materiales como el aluminio, que además de ser ligero, puede tener un tratamiento superficial con resina de poliéster o estar vitrificado. También existen los paneles de concreto armado de alta resistencia o de fibra de cemento recubierto con porcelana de acero esmaltado y los formados por GRC (Conglomerado Reforzado de Fibras de Vidrio).

A diferencia de los revestimientos, los paneles normalmente son colocados en hastiales con iluminación ligeramente por encima de ellos, dejando la bóveda sin cubrir (aunque algunas veces se sí se recubre), todo dependerá de los alcances del proyecto y las necesidades que se tengan del mismo.

La colocación se realiza mediante largueros y bastidores, anclados para cubrir la superficie interior del túnel (Figura 11.13).



Figura 11.13. Ejemplo de panel vitrificado. Tomada de Alliance [Ref. 3].

Cuando se selecciona este sistema, sin un revestimiento definitivo, debe garantizarse que únicamente con los sistemas sostenimiento la excavación sea totalmente estable a largo plazo.

Entonces, en túneles donde se decida no colocar un revestimiento de concreto hidráulico, sino que el túnel se termine únicamente con sostenimiento o con revestimiento de concreto lanzado y por tanto, su acabado sea irregular y rugoso, la colocación de paneles es una opción favorable, que minimiza pérdidas en el flujo del aire de ventilación y mejora la luminosidad. También contribuyen a mejorar las condiciones acústicas del túnel.

Con la colocación de paneles también se dispone de una superficie uniforme y resistente para el fácil anclaje de distintos elementos de señalización u otras instalaciones.

En la Tabla 11.2 se tienen ejemplos de algunos tipos de materiales empleados en la fabricación de paneles [Ref. 3].

Tipo	Características
Acero inoxidable	El acero inoxidable gracias a sus propiedades mecánicas, permite la reducción del espesor de la estructura. Resistencia a la abrasión por roce. Limpieza con agua a presión, detergente y con apoyo de un rodillo de nylon Elevada reflexión de la luz (Ahorro energético) sin producir deslumbramiento. Excelentes propiedades mecánicas, que permiten aligerar las estructuras. Buen comportamiento en caso de incendio: Decaída progresiva y lenta de las propiedades mecánicas de los paneles; utilización de lacados que no propagan las llamas y presentan una baja emisión de humos. Facilidad en las operaciones de limpieza, ya sea automatizadas para la limpieza periódica de las partículas contaminantes que provienen de los tubos de escape de los vehículos o aquellas especiales para la limpieza de graffitis Ausencia de pigmentos tóxicos y aleaciones peligrosas, el panel es reciclable al 100% El panel asegura un buen nivel de luminosidad sin producir deslumbramientos, contribuyendo de esta forma al ahorro energético como a la seguridad del tramo.
Acero vitrificado	Resistencia a la abrasión, resistencia al choque, dureza de la superficie, resistencia al rayado, resistencia a los ácidos, resistencia a los graffitis.
Aluminio liso	El revestimiento en aluminio liso cumple con requisitos de reflectancia, durabilidad, mantenimiento, es estético y reciclable.
Aluminio grecado ondulado	El revestimiento de panel grecado/ondulado cumple con requisitos de reflectancia, durabilidad, mantenimiento estético, es reciclable, y proporciona impermeabilización.
Pintura Especial para Túneles	En los casos de túneles cuyo interior sea concreto aplicado con cimbra deslizante o con dovelas de concreto reforzado, también es posible recubrir los hastiales con productos como pinturas.

Tabla 11.2. Tipo de materiales para fabricación de paneles. Tomada de Alliance [Ref. 3].

11.3. APARIENCIA Y ACABADOS

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, un aspecto de suma importancia en túneles de carretera es el acabado final; es una característica que además de proporcionar estética, permite la colocación eficiente de las instalaciones electromecánicas y de señalización.

El revestimiento de concreto hidráulico presenta grandes ventajas sobre el lanzado por ser uniforme y continuo.

En el caso de los paneles prefabricados, su calidad y apariencia final dependen del tipo de producto y de las especificaciones del fabricante.

En cualquier caso, la calidad en el acabado final del túnel es responsabilidad tanto del proyectista, como del constructor y del supervisor de la obra. Sobre todo en la etapa final de los trabajos de construcción toma especial relevancia la necesidad de verificar que se cumplan todas las especificaciones de proyecto así como con los lineamientos de calidad (Capítulo 14).

11.3.1. Concreto hidráulico

En los casos en los que existe un revestimiento definitivo de concreto hidráulico armado, para lograr un acabado óptimo, en primer lugar se debe tener precaución que el acero de refuerzo no dañe el sistema de impermeabilización ya que si se producen filtraciones es posible que estas entren en el túnel a través de las juntas de construcción.



Figura 11.14. Colocación de acero en clave y hastiales.

Asimismo, se deberá verificar que el recubrimiento de las parrillas de acero no sea menor que el requerido a fin de asegurar que no quede expuesto a la intemperie, sobre todo en ambientes corrosivos (Harmsen, 2005). En el Capítulo 14 de este Manual se describen detalladamente los aspectos de calidad que se deben cumplir con respecto a los materiales y puesta en obra.

Por otra parte, en revestimientos de concreto hidráulico es común observar la presencia de fisuras; no obstante, las fisuras también se presentan por otros factores, como la inadecuada preparación de la superficie de colocación, falta de aditivos, omisión de juntas de contracción y aislamiento, curado inadecuado o nulo, retiro prematuro de la cimbra entre otras.

Es de resaltar que todo concreto tiene tendencia a presentar fisuras y es difícil conseguir un acabado en el concreto completamente libre de éstas; sin embargo, el fisuramiento puede ser

reducido y controlado de manera importante, si se siguen prácticas adecuadas de construcción y no necesariamente mediante la colocación de acero por temperatura.

Un elemento que puede contribuir a disminuir este efecto indeseable es la adición a la mezcla de microfibras sintéticas en dosis no menores de 1 kg/m³.

Otra práctica que comienza a ser cada vez más habitual en el mundo es llevar, por detrás de la cimbra un carro de curado. Después de cada descimbrado, dicho carro cubre el concreto joven y mediante aspersores y vaporizadores se realiza el proceso.



Figura 11.15. Presencia de fisuras, revestimiento concreto simple.

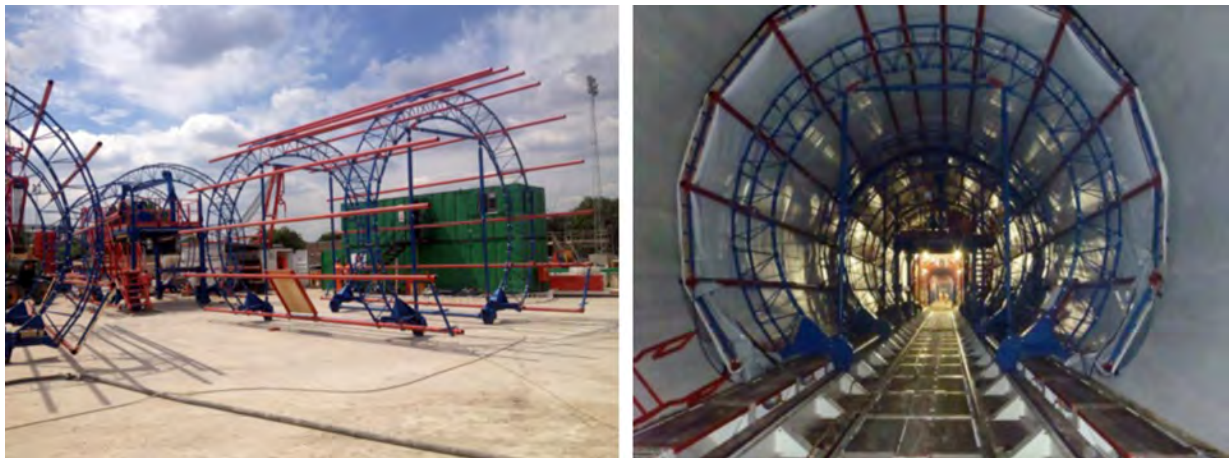


Figura 11.16. Carro de curado empleado en el revestimiento secundario del túnel Lee de Londres [Ref. 2].

En el acabado y apariencia del revestimiento debe imperar la calidad y esto involucra a los materiales y la ejecución de los trabajos; una buena calidad se reflejará en un adecuado funcionamiento y durabilidad en vida útil del túnel. En los caso de revestimientos de concreto, casi siempre, puede generalizarse el concepto *durabilidad* como una propiedad importante que permite tener la capacidad de resistir las condiciones de servicio. El ACI (2005) la define como: “la habilidad para resistir la acción del tiempo: ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente”. Se evalúa “*en función de su capacidad para resistir las acciones de deterioro derivadas de las condiciones de exposición y servicio a que está sometida*”. [Ref. 1]

En el caso de revestimientos de concreto armado, entre las diversas acciones o agentes de carácter no estructural que suelen ocasionar su deterioro prematuro y afectar su apariencia y durabilidad, de manera general, por su frecuencia, destacan las siguientes (Ottazzi, 2004):

Ataque por sulfatos: Los sulfatos se encuentran en sales inorgánicas, presentes en las aguas freáticas. Mientras exista una barrera impermeable (sistema de impermeabilización), el revestimiento podrá ser inmune a su ataque; en caso contrario, dañaría severamente la estructura. Se recomienda el uso de cemento Portland resistente a los sulfatos.

Corrosión del acero de refuerzo: Es uno de los problemas que más importan en el mantenimiento de estructuras de concreto, ya que éste, por un lado, protege al acero de refuerzo de la exposición directa al medio ambiente, y por el otro, la solución encerrada en los poros del concreto es altamente alcalina, formándose una capa que protege al acero de la corrosión. La corrosión del acero de refuerzo tiene dos consecuencias principales que afectan la durabilidad de la estructura.

- Puede reducir la sección de las varillas de acero, mermando fuertemente su adherencia con el concreto.
- La corrosión provoca un aumento de volumen, trayendo como consecuencia esfuerzos internos de tensión en el concreto que agrietan progresivamente el recubrimiento e incluso, lo desprenden totalmente en situaciones de corrosión avanzada.

Otros factores relativos a la corrosión son los siguientes:

- La corrosión puede iniciarse cuando la permeabilidad del concreto (de ser el caso) permita el ingreso de cloruros hasta la superficie del refuerzo.
- La presencia de corrosión depende de la existencia o no de fisuras en el concreto, de la agresividad del medio ambiente, del espesor del recubrimiento, de su calidad y de la impermeabilidad del concreto.
- Cuando las temperaturas ambientales son altas aceleran las reacciones químicas.
- Los ciclos continuos de humedecimiento y secado en el concreto la favorecen.

Ciclos de congelación y deshielo: Se presenta cuando el agua contenida en los poros del concreto se congela, normalmente en los climas fríos, lo que aumenta su volumen, al expandirse genera esfuerzos internos lo suficientemente fuertes como para dañar aún a los concretos más resistentes. La repetición de ciclos de congelación–deshielo provoca esfuerzos fluctuantes en el concreto que pueden llevarlo a la falla por fatiga.

Resistencia de la estructura frente al fuego: La estructura deberá mantener su resistencia frente al fuego durante el tiempo establecido en correspondencia con la normativa aplicable, de manera que se limite la propagación del fuego y se facilite la evacuación de los ocupantes y la intervención de los equipos de rescate y extinción de incendios (de ser el caso). Una práctica habitual y cada día más extendida es la inclusión de microfibras sintéticas.

Además de lo anterior, es importante verificar la ejecución de los trabajos, que se realicen con personal especializado, conforme las necesidades y exigencias del proyecto. Tomar en cuenta con el debido cuidado cada uno de los factores descritos, impactará en el acabado final del revestimiento, sobre todo cuando se trata de concreto hidráulico reforzado.

11.3.2. Concreto Lanzado

Cuando se trata de revestimientos de concreto lanzado, para que exista una adecuada apariencia, debe garantizarse la calidad en la mezcla, que cumpla satisfactoriamente con las especificaciones de diseño y de calidad en su colocación.

En cuestiones de calidad, suelen realizarse pruebas a pie de obra, previas a su colocación. El comportamiento del concreto, en general, depende tanto de las proporciones de cada uno de sus componentes, como de sus propiedades individuales. Mediante las pruebas de laboratorio

se determinan las propiedades de los materiales, permitiendo, por una parte, diseñar la correcta dosificación y, por otra, prever su comportamiento con el tiempo. La mayor parte de los problemas que presentan los concretos son producidos por una dosificación inadecuada. Pero nada se conseguirá afinando más los métodos de dosificación, si no mejora paralelamente el control, (López et al., 2003). Como complemento, en el Capítulo 14 se describe lo relativo al control de calidad de los materiales y trabajos.

Un factor que da una mala apariencia, cuando se emplea el concreto lanzado como revestimiento definitivo, es no rellenar bien los espacios entre marcos metálicos, quedando la superficie expuesta del túnel con un acabado a modo de “costillas”. Este acabado, además de impedir una correcta distribución de la luz en el interior, crea un efecto desagradable en la visión del conductor: una rápida sucesión de luces y sombras. Por otro lado, el dejar los marcos metálicos tan cerca de la intemperie, en un mediano plazo puede producir efectos de corrosión, con las consecuencias antes mencionadas. En la Figura 11.18 puede verse un acaso en el que sucede lo anteriormente descrito.



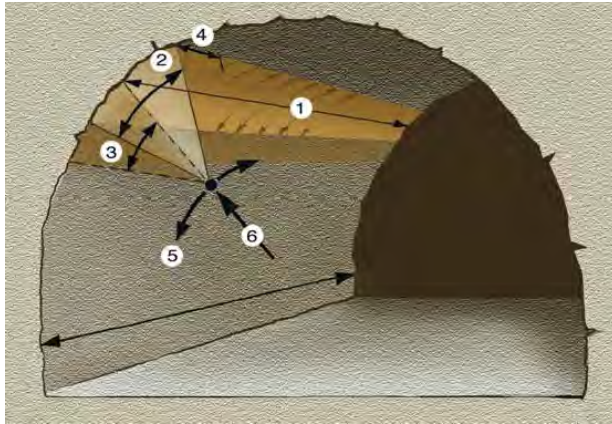
Figura 11.17. Efecto de “costillas” en el revestimiento definitivo de concreto lanzado. Túneles Supervía Poniente, Ciudad de México.

Entre las malas e inadecuadas aplicaciones del concreto lanzado como revestimiento definitivo están el exceso de agua en la mezcla, la mala posición de la boquilla al lanzar, rebote excesivo, etc., que resultan en una colocación no homogénea, con graves defectos que demeritan el acabado.



Figura 11.18. Defectos de aplicación concreto lanzado.

En la Figura 11.19 puede observarse la forma adecuada en la se aplica el concreto lanzado, siempre buscando la perpendicularidad con respecto a la superficie de lanzado.



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

Figura 11.19. Diagrama del manejo de la boquilla. Tomada de Sika (2010).

Según los proveedores más reconocidos en materia de concreto lanzado, la calidad final y por lo tanto su apariencia, dependen fundamentalmente de los operarios, en especial, que asistan a cursos y reciban una formación completa de su especialidad. El encargado deberá poseer una gran experiencia, y haber trabajado como lanzador al menos durante cinco años.

La apariencia y acabado en el concreto lanzado dependen también de factores como el medio de exposición: el estado del soporte, ataques físicos, ataques químicos, estados de esfuerzos en el entorno del túnel durante el endurecimiento y vida útil, cambios de temperatura, heladas, etc.; factores debidos a la puesta en obra: espesor de las capas, número de capas, adherencia entre capas, rebote, adherencia al sostenimiento primario, curado del concreto, compactación después de la puesta en obra, temperaturas durante el transporte, etc.); factores debidos a la composición de la mezcla: dosificación, impermeabilidad del concreto, calidad de los agregados, compatibilidad de los aditivos, cemento y agua de la mezcla, densidad del concreto, aditivos y acelerantes.

Como revestimiento, el concreto lanzado constituye la última capa, aquella que está expuesta a distintos agentes. Se debe prestar especial atención a la durabilidad y a los factores que la afectan, entre los que cabe hacer énfasis:

- Exposición del concreto lanzado a variaciones de temperatura y humedad, ciclos hielo/deshielo, cargas y deformaciones impuestas, acciones abrasivas, ataque químico del agua y componentes agresivos atmosféricos (de ser el caso).
- Resistencia mecánica en relación a las cargas, ductilidad, cargas dinámicas, etc.
- Durante la ejecución, habilidad del operador, calidad de la máquina, preparación de la superficie, método de proyección (vía seca, vía húmeda), uso de aditivos, tipos de cemento, curado, etc.
- Balance entre diseño y requisitos: un concreto de baja calidad puede satisfacer los requisitos como sostenimiento provisional no estructural, pero fallar a largo plazo. Por el contrario, un concreto de alta calidad, si está adecuadamente reforzado, si se fisura por efecto de grandes deformaciones, podría fácilmente sufrir problemas de corrosión debido a la exposición del acero a los agentes agresivos.

Es importante tener en cuenta que alguno de los componentes del concreto lanzado, e incluso algunas de sus propiedades, pueden tener efectos negativos sobre la durabilidad del concreto (Sika, 2010).

En criterios de durabilidad, el ACI [Ref. 1] contiene un apartado referido a requisitos donde expone categorías de las condiciones de exposición de las estructuras de concreto, dependiendo del grado de severidad de ésta. Estas categorías consideran las afectaciones que repercuten en su apariencia a largo plazo.

En la foto de la Figura 11.20 puede verse un acabado final de buena calidad de un revestimiento definitivo de concreto lanzado. Este revestimiento incluye un sistema de drenaje moderno, con geotextil, geomembrana y conducción longitudinal.



Figura 11.20. Acabado final del revestimiento de concreto lanzado en el túnel Chimalpa I. Carretera Toluca-Naucalpan. Consultec Ingenieros Asociados, 2015.

11.3.3. Paneles de acero esmaltado

Uno de los elementos que entra en este rubro, de acuerdo con la apariencia y terminado que ofrecen una vez colocados, son los paneles prefabricados; su fabricación se lleva a cabo conforme lo establezcan las normativas aplicables y de acuerdo con el fabricante y país de origen. En la Figura 11.21 se muestra el revestimiento de un túnel mediante paneles. En el mercado se pueden encontrar también paneles fabricados de acero inoxidable y aluminio.



Figura 11.21. Panel de acero esmaltado. Tomada de Alliance [Ref. 3].

El revestimiento como acabado final, debe tener la capacidad de resistir condiciones del ambiente, tráfico, abrasión, impactos y agentes contaminantes que pudieran deteriorarlo en un corto tiempo y con mayor facilidad y, además, se requiere que brinde seguridad y durabilidad, mejorar la ventilación, la iluminación y que sea resistente al fuego, de este último, en relación con eventos de incendios ocurridos en distintos túneles carreteros en el mundo; entre el más conocido, el caso del Túnel Mont Blanc (Francia e Italia); al respecto, es posible consultar lo establecido por la Directiva 2004/54/CE del parlamento europeo sobre requisitos de seguridad en los túneles carreteros.

Los paneles de acero esmaltados son una opción que cubren tales necesidades y requerimientos; el material del que se compone cuenta con las siguientes características: se conforma por una mezcla de minerales fundidos como en el caso del vidrio. Esta cualidad lo hace ideal para su empleo en túneles carreteros, además de otro tipo de construcciones.

Los paneles de este tipo, cuentan con propiedades que cubren las condiciones expuestas, de acuerdo con fabricantes se tienen algunas características de tipo funcional, como resistencia a la abrasión, al rayado, resistencia a los ácidos y al grafiti.

En cada caso, la fabricación de estos elementos debe apegarse a la normativa de calidad aplicable, tanto a los requerimientos de calidad como a las pruebas que los materiales; una norma aplicable es la ISO 4532 relativa a la determinación de la resistencia con pruebas como la de dureza superficial, rayaduras y cortes de superficie; otra es la ISO 2742 relacionada con determinación de la resistencia a los ácidos.

El vitrificado de los paneles será ejecutado cumpliendo con las necesidades y requerimientos establecidos en proyecto, teniendo como prioridad, un adecuado acabado, apariencia y funcionalidad en el interior del túnel.

Dentro de las principales ventajas que tienen los paneles de revestimiento en túneles sobre otro tipo de revestimientos, son:

- Reduce costos de construcción y mantenimiento.
- Reduce tiempo de ejecución en las obras.
- Estimula seguridad al usuario.
- Ofrecer a la infraestructura una imagen de gran calidad.
- Eficiencia energética en su operación

No obstante, son elementos que no tienen ninguna capacidad estructural, y que al momento de seleccionarlo como revestimiento de un túnel, serán los sistemas de sostenimiento darán estabilidad de manera temporal a la excavación y garantizarla a largo plazo.

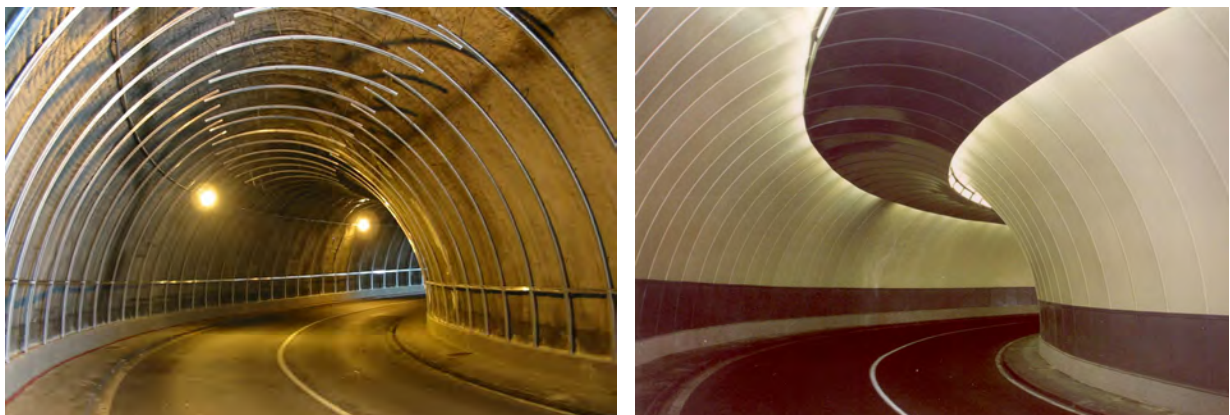


Figura 11.22. Panel de acero esmaltado. Tomada de Alliance [Ref. 3].

En el caso de los paneles de acero vitrificados se instalan con gran rapidez y sencillez, ya que únicamente necesitan de una estructura auxiliar y perfiles de fijación (Figura 11.22), colocados sobre el revestimiento de concreto hidráulico. Por el tipo de construcción se requiere de equipos especiales y tiempos mayores de ejecución.

Los paneles aportan una notable mejora y uniformidad de los sistemas de iluminación, además de ofrecer un excelente guiado visual al conductor, lo que se traduce en seguridad hacia los usuarios.



Figura 11.23. Panel de acero esmaltado. Tomada de Alliance [Ref. 3].

11.3.4. Pinturas cerámicas

De acuerdo con investigaciones que se han realizado en varios países (Francia, EE.UU., Noruega, etc.), indistintamente de los materiales que se empleen como revestimiento (concreto hidráulico, concreto lanzado, dovelas, etc.), el tratamiento de la superficie vista es uno de los elementos que más influyen en el confort visual y en la percepción de comodidad y seguridad del usuario. Al igual que en el caso de los paneles prefabricados, la solución que aportan las pinturas cerámicas, puede contribuir a romper la monotonía visual y además, puede aprovecharse su efecto dinámico para dar información al usuario sobre la geometría del trazado, la limitación de velocidad y la ubicación de áreas de seguridad (teléfonos, refugios, etc.); proporciona comodidad visual y por lo tanto seguridad de circulación en el túnel.

Con base en algunos estudios, relativo al tratamiento de las paredes o hastiales de los túneles carreteros, al emplear solo pintura aplicada sobre las paredes de forma horizontal (Figura 11.24), se consigue una adecuada percepción del trazado longitudinal del túnel, distinguiéndose bien las pendientes y sus cambios durante el paso a través del túnel.



Figura 11.24. Pintura cerámica aplicada directamente sobre el concreto. Tomada de Alliance [Ref. 3].

Mientras que, cuando se emplean en combinación con bandas o líneas verticales (Figura 11.25), pero dando mayor contraste a las horizontales para no perder la sensación de continuidad, se consigue reunir en un solo patrón geométrico una buena percepción de todas las variables analizadas: velocidad, curvaturas y cambios de pendiente (Manual de Túneles y obras Subterráneas).



Figura 11.25. Pintura cerámica aplicada directamente sobre el concreto. Tomada de Alliance [Ref. 3].

La pintura no solo se aplica en revestimiento de concreto hidráulico, es un acabado utilizado también cuando los túneles han sido construidos con elementos prefabricados como las dovelas.

El recubrimiento debe satisfacer todas las condiciones de seguridad que se establezcan en la normativa aplicable o conforme el proveedor lo marque, además de tomar en cuenta las necesidades del proyecto y del cliente (Figura 11.26). En México aún no se cuenta con proyectos de tales características, pero ya son una opción en materia de infraestructura carretera.



Figura 11.26. Pintura cerámica aplicada sobre dovelas. Tomada de Alliance [Ref. 3].

Es un recubrimiento que ofrece un acabado duradero y decorativo al mismo tiempo dispone de las siguientes ventajas:

- Protección a la carbonización.
- Resistente al ataque químico de los agentes contaminantes que se encuentran en los túneles (gases de motor de los vehículos, aceites, petróleo, azufre y detergentes alcalinos).
- Perfecciona la reflectancia de la luz.
- Facilidad en la limpieza.
- Resistencia ante lavado a presión.

- Buena adherencia a todo tipo de concreto.
- Impermeable al agua.
- Retarda la degradación del cemento.
- Su acabado liso facilita la ventilación.
- Facilita la señalización, reduciendo accidentes.
- Garantía de desgaste, de acuerdo con el plan de mantenimiento.
- Variedad en colores para su empleo en interior de túneles de carretera.

Con respecto a la reflectancia óptima, debe siempre estar por encima del 60% y con un óptimo valor del 85%, según se obtiene con la aplicación del color Magnolia a las paredes (hastiales) y negro o gris a los techos (clave). Con esta reflectancia se asegura que los mecanismos automáticos de incidentes y de circuito cerrado capten una imagen sin distorsión a lo largo del túnel.

Su aplicación se puede hacer con equipos como pistolas que trabajan a presión o con rodillos, de tal manera que se apliquen dos o tres capas, dependiendo del acabado que se desea y de la calidad que presente la superficie de concreto expuesta (revestimiento o sostenimiento). Además también depende de la longitud del túnel y de la densidad de vehículos.

Cuando se opta por recubrir las paredes del túnel con pintura, independientemente del tipo de revestimiento, se busca brindar una mejor iluminación, particularmente en aquellos de gran longitud, esto se logra aplicando recubrimientos claros. Asociado a esto, especialmente los colores claros, da un confort visual en la conducción y por consiguiente una disminución en los accidentes de tránsito.

REFERENCIAS

- 1 ACI (2005) American Concrete Institute - Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural: http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf
- 2 Allen, C. (2014). "The Lee Tunnel Secondary Lining. Innovation and a Learning Curve in High Pressure Ground Water". CA Consult Ltd.
- 3 Alliance (S/A): <http://www.acerovitrificado.com/revestimiento-tuneles.asp>
- 4 ASTM A 820 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete
- 5 Carrillo J. et al., (2013). Correlaciones entre las Propiedades Mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 3, julio-septiembre). Facultad de ingeniería UNAM.
- 6 González de Vallejo et al. Ingeniería Geológica. Madrid España. : Pearson Prentice Hall, 2002
- 7 Gullón A. La calidad en las obras subterráneas. En Ingeo Túneles: Ingeniería de Túneles, libro 2. Madrid, España: Edición, Mostoles.
- 8 Gullón A. *La calidad en las obras subterráneas*. En Ingeo Túneles: Ingeniería de Túneles, libro 2. Madrid, España: Edición, Mostoles.
- 9 Harmsen T. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado*, (4ta. Edición). Lima, Perú. Editorial Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 10 Hermida, G (2010). "Revestimiento de túneles en concreto lanzado con fibras". Reunión del concreto, Colombia 2010. Disponible en: http://www.asocreto.org.co/rc_2010/pdf/Presentaciones_finales_RC2010/tuneles/11%20Revestimineto%20de%20tuneles%20en%20concreto%20lanzado%20con%20fibras_German%20Hermida.pdf
- 11 Hernández, O. et al (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM e Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 12 Hernández, O. et al. (2005). *Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*. Ingeniería, investigación y tecnología, vol. 7 No. 1. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM e Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- 13 IMCYC (2008): <http://www.imcyc.com/ct2008/feb08/materia.htm>
- 14 López, C. et al. (1997). Manual de Túneles y Obras subterráneas, (2da. edición). Madrid, España: Edición, MOSTOLES.
- 15 Maccaferri Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón; Manual técnico
- 16 Mármol Salazar, P. C. (2010). "Hormigón con Fibras de Acero Características Mecánicas" (Tesis Maestría). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
- 17 Mármol Salazar, P. C. (2010). *Hormigón con Fibras de Acero Características Mecánicas*. (Tesis Maestría). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
- 18 Oggeri C. (2005). *Características técnicas para procedimientos de calidad en la construcción de túneles*. En Ingeo Túneles: Ingeniería de Túneles, libro 10. Madrid, España: Edición, Mostoles.
- 19 Ottazzi, P. G. (2004). *Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Graduados. Lima Perú.
- 20 Ramírez et al., 2004. Mecánica de Rocas. Disponible en: http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf
- 21 Rico A. La ingeniería de Suelos en las vías terrestres tomo 2. México, Editorial Limusa, 2005
- 22 Rico A. La ingeniería de Suelos en las vías terrestres tomo 2. México, Editorial Limusa, 2005
- 23 Riva, E (2006). "Durabilidad y patología del concreto": <http://es.slideshare.net/mariobariffo/durabilidad-ypatologiadelconcretoenriquerival>

- 24 Sánchez, F. (2014): "Ingeniería de Túneles". Reg. # 03-2015-012110003000-1, SEP-INDAUTOR.
- 25 Sánchez, F. (7 y 8 noviembre 2013). *Técnicas modernas de cálculo en medios continuos para el diseño de excavaciones subterráneas en roca*. AMITOS, 3er Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca.
- 26 Sika (2010). "Manual de Concreto Proyectado en la Construcción de Túneles". Edición Putzmeister AG
- 27 Vandewalle, M. 2005. Tunnelling is an Art. Bekaert SA. Zwevegem, Belgium.

