

REFUERZO DEL FRENTE DE EXCAVACIÓN CON ELEMENTOS DE VIDRIORESINAS PARA AVANZAR A SECCIÓN COMPLETA EN TÚNELES CON TERRENOS DEBILES

Gianfranco Perri ¹

Resumen

Después de una breve introducción sobre el tema y después de comentar los principales antecedentes que han llevado a la utilización de los elementos de vidrioresinas en el diseño y construcción de túneles, se ilustran los principios y conceptos básicos sobre los cuales se fundamentan la teoría y la práctica de esta metodología. Luego se dedica un capítulo a ilustrar algunas de las primeras aplicaciones de la tecnología de la vidrio-resina en la excavación de túneles en terrenos con precarias condiciones geomecánicas y se continúa con un capítulo enteramente dedicado a describir las tipologías geométricas, morfológicas y estructurales más comunes de los elementos VTR. Finalmente siguen dos capítulos relativos a los temas del diseño, bien sea de cada uno de los elementos que constituyen un Sistema VTR y bien sea del Sistema VTR mismo, y entre estos capítulos se abre una paréntesis para comentar los campos de aplicación de los Sistemas VTR en relación con las posibles clases de comportamiento de la excavación en un túnel. Se termina con un capítulo de conclusiones y con la Bibliografía esencial sobre el argumento tratado.

Palabras Clave Estabilización Vidrioresinas Frente Excavación Túneles

INTRODUCCIÓN

Dentro del continuo proceso de innovación tecnológica desde hace varios años, en la construcción de túneles excavados en terrenos difíciles en condiciones críticas en relación con la estabilidad de la excavación, se ha venido experimentando una técnica de consolidación (o de refuerzo, o de armado) del núcleo del terreno que constituye el frente de excavación, mediante la introducción en el mismo de un conjunto de elementos estructurales lineales, colocados uniformemente distribuidos y paralelos al eje del túnel. Los referidos elementos estructurales lineales de refuerzo del terreno del frente del túnel, se introducen dentro de los agujeros previamente perforados para tal fin y se cementan al terreno, generalmente inyectando oportunamente en los agujeros el clásico mortero de agua-cemento.

La idea de introducir elementos estructurales paralelos al eje del núcleo de avance de un túnel, con el objeto que los mismos pudiesen aplicar con su reacción una oportuna presión estabilizante sobre el mismo frente de excavación, ciertamente surgió como natural evolución de las más antiguas y comprobadas técnicas de estabilización del frente basadas en la aplicación directa de tal presión sobre la superficie expuesta del frente, bien sea mediante precarias acciones mecánicas de apuntalamiento como las que se aplicaban en las antiguas excavaciones convencionales (Figura1) o bien sea mediante las muy problemáticas peligrosas y finalmente abandonadas técnicas del aire comprimido que se aplicaban en las excavaciones con escudos.

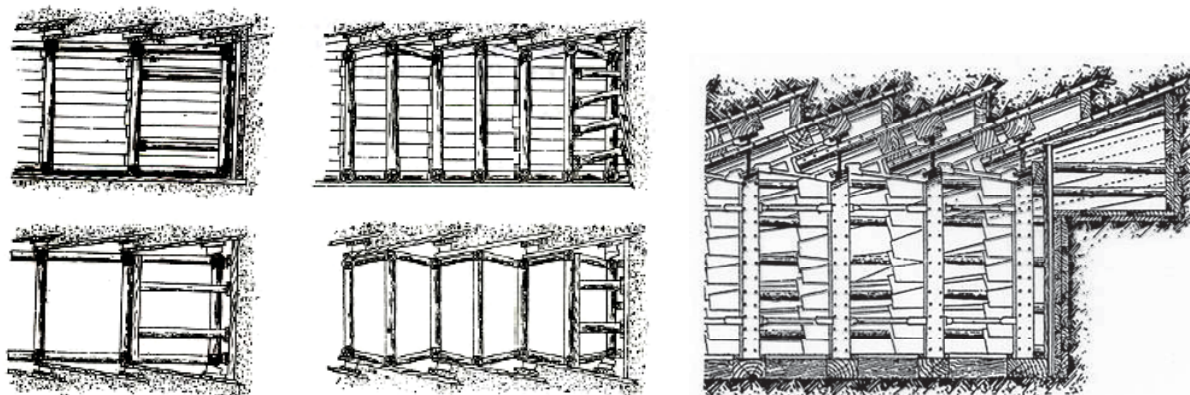


Figura 1 – Ejemplos de las antiguas técnicas de estabilización del frente de excavación

¹ Profesor de Diseño de Túneles en la Universidad Central de Venezuela - Ingeniero Proyectista y Consultor - gianfrancoperri@gmail.com

En la práctica de las excavaciones convencionales, la técnica universalmente utilizada para poder excavar un túnel en condiciones precarias de estabilidad era de hecho recurrir al avance a sección pluri-parcializada, siguiendo alguno de los varios esquemas ampliamente experimentados y conocidos con los sugestivos nombres de Método austriaco, Método italiano, Método belga, etc. los cuales se diferenciaban entre sí, además que por el nombre, esencialmente por la secuencia espacial que se adoptaba en el avance de las numerosas secciones parciales en las que se subdividía la entera sección del túnel y que avanzaban desfasadas a lo largo del eje del túnel en el intento perseguido de poder controlar la estabilidad de cada porción, frente a la imposibilidad de poder garantizar la estabilidad de la sección completa o de por lo menos la media sección del túnel. Tal manera de proceder obviamente resultaba muy complicada, lenta, ineficiente y peligrosa y es por lo tanto fácilmente explicable que haya habido varios intentos dirigidos a poder de alguna manera evitar tales problemáticos procedimientos, y cada vez con más empeño toda vez que más urgente y tajante se iban manifestando la necesidad de mejorar la productividad y la seguridad y la condición de trabajo de los mineros empeñados en construir grandes túneles.

Dentro de este orden de ideas, es ciertamente intuitivo que aplicando un confinamiento o una presión de contención sobre un frente de excavación de un túnel que se encuentre en condiciones de estabilidad precaria, se contribuye decididamente a incrementar su estabilidad. Sin embargo es quizás algo menos intuitivo considerar que no solamente la estabilidad del frente, si no la simple rigidización del mismo, contribuye sustancialmente a mejorar la estabilidad de la entera cavidad próxima al frente, aquella que se viene a formar entre el soporte recientemente aplicado y el frente de avance cuya estabilidad se debe garantizar para que la excavación del túnel pueda avanzar en condiciones de suficiente seguridad y con suficiente espacio libre para así alcanzar una satisfactoria productividad mediante un proceso constructivo industrializado, también en condiciones geomecánicas adversas. Existe en efectos una indudable relación directa entre la deformación del núcleo del frente de avance del túnel y el comportamiento de la cavidad: regulando la rigidez del núcleo es posible controlar la respuesta deformatoria de la cavidad y en consecuencia controlar en gran medida su estabilidad. Tal principio lo ha ampliamente estudiado y difundido el profesor Pietro Lunardi a partir de la segunda mitad de los años '80, hasta perfeccionarlo con la elaboración formal de una metodología de diseño de túneles, denominada ADECO-RS (Figura 2) y luego publicada en todos sus detalles (Lunardi, 2006).

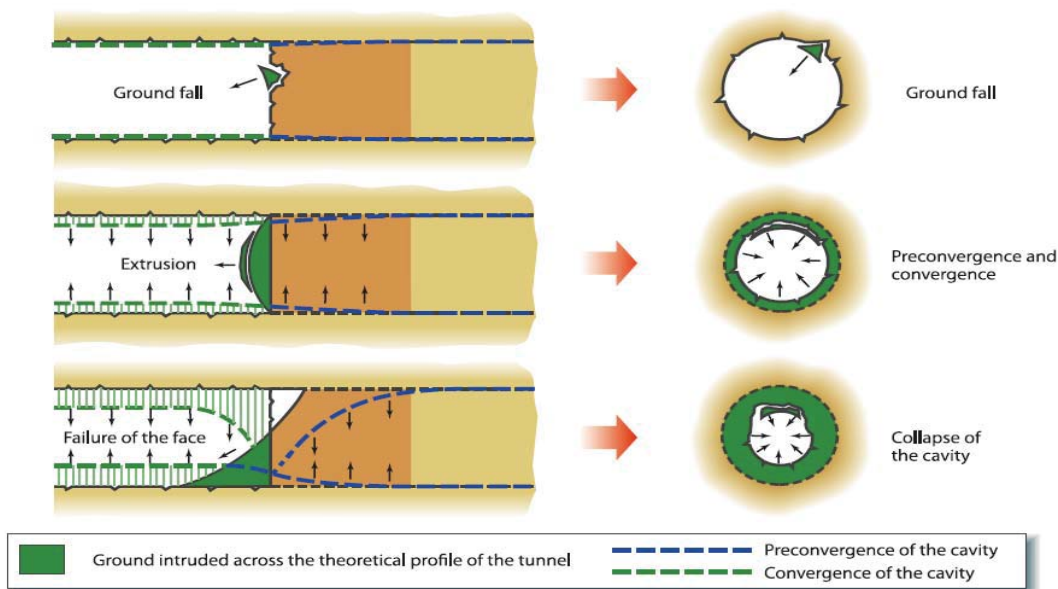


Figura 2 – Principio de la metodología ADECO-RS del profesor Pietro Lunardi

Una vez entendido a fondo el fenómeno, la primera idea fue naturalmente clavetear (hincando clavos o pernos metálicos de longitud limitada a pocos metros) el frente de excavación para evitar los desprendimientos en el mismo, pero la idea se transformó en aplicación práctica al difundirse la tecnología de los pernos de vidrio-resinas (fibras de vidrio cementadas y moldeadas con resinas sintéticas) los cuales alcanzaban capacidades a la tracción comparables con las de los cables y pernos metálicos, con longitudes notables y obviamente pesos sustancialmente inferiores, permitiendo un ágil manejo y sobre todo, no representando estorbo en el abatimiento y excavación del núcleo del frente.

TECNOLOGÍA DE LAS VIDRIORESINAS

La gran ocasión se presentó con la construcción de la ferrovía de alta velocidad entre Roma y Florencia en los Apeninos italianos (Lunardi, 1985), donde la pésima calidad geomecánica de las formaciones geológicas a atravesar, constituidas por terrenos limosos arcillosos y arenosos e inclusive a veces bajo falda freática, implicaba enormes dificultades para la excavación de los numerosos túneles previstos en el proyecto para un total de aproximadamente 11 kilómetros. En adelante, las aplicaciones exitosas de los elementos de vidrioresinas para reforzar y estabilizar el frente de túneles en terrenos difíciles se han multiplicado y difundido enormemente en muchas partes de Europa y América.



Figura 3 – Ejemplos de aplicación de las vidrioresinas (VTR) en la excavación de túneles en Europa y América

En cuanto a las tecnologías de los elementos de vidrioresinas VTR, la evolución desde los iniciales pernos o barras de sección circular, lisas o corrugadas (Figura 4), hacia los elementos tubulares (Figura 5) fue natural e inmediata para facilitar y optimizar el proceso de inyección necesario a la cementación de los elementos VTR al terreno.



Figura 4 – Elementos VTR lisos de sección circular



Elementos VTR corrugados de sección circular

También los tubos VTR fueron inicialmente lisos, luego se mejoró su adherencia al mortero cementante con la incisión de canales helicoidales conformados sobre la su perficie cilíndrica externa del tubo mediante el corte de material, y finalmente obteniendo una adherencia aún mejorada pero arrugando las mismas fibras sin operar su corte.



Figura 5 – Elementos VTR de sección anular

Elementos VTR de sección anular corrugada

Sucesivamente, se introdujeron también elementos VTR planos a sección rectangular en forma de platinas, cuya flexibilidad facilita el transporte en rollos, permitiendo la confección in situ de los elementos a utilizar, seleccionando longitud y cantidad de platinas con las cuales confeccionar los elementos en función de las exigencias de cada proyecto específico. También se han experimentado elementos a forma de Y o Estrella, con agujero central o con una manguera plástica separada de inyección, así como necesariamente ocurre en los antes descritos elementos en forma de platinas.



Figura 6 – Elementos VTR de sección rectangular ensamblados en series de tres y a estrella perforados o no

Finalmente y más recientemente, también se han incorporado al mercado diferentes elementos VTR especiales, o sea con características específicamente adaptas para aplicaciones en condiciones no rutinarias, com o por ejemplo las que requieren de elevadas presiones de inyección con eventual reinyección y su atento control, o las en que es necesario controlar los volúmenes de la misma inyección garantizando al mismo tiempo una elevada adherencia en terrenos muy fracturados o muy blandos. En el primer caso se trata de elementos VTR tubulares que incluyen una serie de válvulas oportunamente distribuidas sobre su longitud y que además se complementan con una camisa plástica internamente solidaria de alta resistencia, mientras en el segundo caso (Figura 7) se trata de elementos VTR aún tubulares, pero complementados con una manga o saco externo constituido por un especial geotextil.



Figura 7 – Elementos VTR tubulares con geotextil externo para controlar el volumen de inyección y la adherencia

DIMENSIONADO DE ELEMENTOS VTR

Por dimensionado se entiende el diseño del sistema VTR que se decida implementar en un determinado sector de un túnel cuyo comportamiento geomecánico es tal que su estabilidad durante la construcción no puede ser garantizada con los tradicionales métodos de excavación y soporte, a menos de recurrir a la pluri-parcialización de la sección de avance, con todos los consecuentes inconvenientes que con tal solución derivan en términos de productividad y de seguridad. El dimensionado del sistema VTR por lo tanto, debe incluir la definición de la tipología y de la cantidad de elementos a colocar en el frente de la excavación, y además sus longitudes, distribución, solapes y demás características geométricas y especificaciones constructivas del sistema. Dentro de este orden de ideas para tratar del dimensionado, es oportuno separar los aspectos relativos a la estabilidad global del sistema y de la cavidad, de los aspectos que se refieren a la estabilidad específica de cada uno de los elementos VTR que, actuando como un conjunto, conforman el sistema.

Desde un punto de vista conceptual, el primer punto puede inicialmente reducirse a la determinación de la presión de contención que es necesario aplicar sobre el frente del túnel para garantizar su estabilidad y con la cual al mismo tiempo inducir un comportamiento suficientemente rígido del mismo núcleo que finalmente limite su deformación vertical, constituyéndose así en un pilar suficientemente rígido para el techo de la cavidad, contribuyendo decididamente a la estabilidad de la misma.

El segundo punto en cambio se refiere a la carga unitaria que, para garantizar aquella presión de contención requerida, debe ser desarrollada axialmente por cada elemento VTR y cuya magnitud debe ser compatible, sea con la resistencia estructural a tracción de la sección de vidrio-resina del elemento, sea con la resistencia al corte a lo largo de la superficie del contacto VTR-concreto y sea con la resistencia al corte a lo largo de la superficie cilíndrica del contacto concreto-terreno. En otras palabras, se trata de la resistencia a la extracción (pull-out) del elemento VTR cementado en el terreno, pero y obviamente, no del elemento con toda su longitud de instalación, sino con su longitud residual, o sea la del solape con el que debe necesariamente conformarse cada campo o sistema respecto al campo inmediatamente anterior, para mantener la continuidad del efecto estabilizante y rigidizante.

Aunque se trata de conceptos teóricamente muy sencillos con lo cual el dimensionado interno de cada elemento VTR resulta en efectos casi trivial, cierta complicación puede derivar de la necesaria concomitancia con la cual deben actuar todas las tres resistencias involucradas, y de la conveniencia práctica que cada una de las tres resulte movilizadas en porcentajes por cuanto posible similares y relativamente próximos al 100%, ya que por tratarse de estructuras temporales no se requieren elevados factores de seguridad.

Indicando: -con σ_t la resistencia unitaria a la tracción del elemento de vidrio-resina de sección A y de perímetro P ; -con t_{v-c} la resistencia unitaria al corte entre vidrio-resina y concreto sobre la superficie de contacto entre los dos; -con t_{c-t} la resistencia unitaria al corte entre concreto y terreno sobre la superficie de contacto entre los dos; -con D el diámetro de la perforación ejecutada para alojar la vidrio-resina y -con L la mínima longitud activa del elemento, se obtienen las siguientes tres resistencias o capacidades en objeto:

- Capacidad del elemento estructural de vidrio-resina $T = \sigma_t A$
- Capacidad entre la vidrio-resina y el concreto $T_{v-c} = t_{v-c} P L$
- Capacidad entre concreto y terreno $T_{c-t} = t_{c-t} \pi D L$

En estas tres ecuaciones, los datos pueden estar en principio representados por la resistencia unitaria a la tracción del elemento de vidrio-resina σ_t y por la resistencia unitaria al corte entre vidrio-resina y concreto t_{v-c} ya que la variabilidad de ambas resistencias resulta en práctica bastante limitada, aunque la segunda puede estar parcialmente condicionada por la tipología tecnológica del mismo elemento de vidrio-resina. Las incógnitas por otro lado están en principio representadas por las características geométricas A , P y L del elemento estructural de vidrio-resina, por el diámetro nominal D de la perforación o cilindro del mortero cementante y por la resistencia unitaria al corte entre concreto y terreno t_{c-t} fuertemente dependiente de la naturaleza geotécnica del terreno mismo además que de la naturaleza y calidad de la inyección cementante.

Pasando luego de la teoría a la práctica, es sin embargo posible asignar carácter de datos con aproximación aceptable también a los parámetros geométricos D y L ya que el primero, el diámetro de la perforación, es por lo general del orden de las 4 pulgadas unos 115 mm mientras el segundo, la longitud mínima activa del elemento, depende

en principio de las dimensiones de la sección del túnel, ya que debe mantener dimensiones mínimas suficientemente compatibles con los modos de falla potencial del frente: en la práctica se utilizan por lo general longitudes próximas al 50% de la altura de la sección de excavación. Con todo lo anterior, se puede finalmente llegar a señalar que es la resistencia unitaria al corte entre el concreto y el terreno t_{c-t} el principal parámetro a determinar explícitamente en cada caso, además de obviamente la geometría de la sección del elemento estructural de vidrioresina a emplear.

Las características geométricas, de resistencia y de adherencia de todos los varios elementos estructurales de vidrioresina disponibles en el mercado se encuentran detalladamente reportadas por los fabricantes en sus catálogos de especificaciones técnicas, mientras es necesario o cuanto menos recomendable obtener los demás parámetros de diseño directamente en cada caso mediante la ejecución en campo de adecuadas pruebas de pull-out, que son relativamente fáciles de ejecutar. Sin embargo, en las fases de diseño preliminar puede recurrirse a los datos paramétricos disponibles en la bibliografía especializada, relativos a los coeficientes de adherencia entre los varios tipos de terreno y el mortero comúnmente inyectado para la cementación, también eventualmente referidos a pernos anclajes o micropilotes, entre otros, así como los que a manera de ejemplo se reportan en la tabla que sigue, de la cual puede observarse cómo para una longitud activa del orden de 5 metros, la capacidad movilizable por cada elemento de vidrioresina que conforma el sistema, está medianamente comprendida entre 10 y 50 toneladas para elementos perforados con un diámetro nominal del orden de 4 pulgadas (115 mm).

TIPO DE TERRENO	t_{c-t} (t/m^2)	D (=0,115 m)	T_{c-t}/L (t/m)	T_{c-t} (t) ($L = 5m$)
<i>Suelos predominantemente cohesivos</i>	10		2	9
<i>Suelo predominantemente granulares</i>	20		4	18
<i>Suelos residuales y roca descompuestas</i>	30		5	27
<i>Rocas muy meteorizadas y muy fracturadas</i>	40		7	36
<i>Rocas alteradas y fracturadas</i>	50		9	45

Analizando finalmente las tablas reportadas por algunos catálogos representativos de los más comunes productos estructurales fabricados en de vidrioresinas, se observa que: -La resistencia unitaria a la tracción σ_t es de entre 500 y 1000 N/mm² dependiendo de las características mecánicas y proporciones de los dos componentes principales de la mezcla, fibras de vidrio y resina.-El área de la sección resistente es el orden de 500 a 1000 mm² con lo cual se obtienen en consecuencia capacidades estructurales de entre 250000 y 1000000 N (25 y 100 toneladas).-La adherencia entre vidrioresina y concreto t_{v-c} es del orden de entre 100 y 200 t/m² y con la misma se alcanzan por lo general capacidades T_{v-c} del orden de 15 a 50 toneladas por metro lineal de elemento, absolutamente compatibles con las capacidades estructurales, y decididamente muy superiores a las correspondientes al contacto entre concreto y terreno.

CAMPOS DE APLICACIÓN DE SISTEMAS VTR

En la excavación de un túnel pueden producirse diferentes escenarios en cuanto al comportamiento de la cavidad que se va abriendo. Tal comportamiento, más sintéticamente identificable como "Clase de comportamiento de la excavación", depende de la combinación de un conjunto de numerosos y complejos factores que, con el máximo de la simplificación, pueden resumidamente identificarse con el estado de sollicitación natural preexistente en el medio a excavar y con la resistencia geomecánica del mismo. El estado de sollicitación natural, en primera aproximación, puede (a falta de elementos adicionales como por ejemplo mediciones directas o indirectas en sitio) asociarse directamente con la profundidad o cobertura (H) de la excavación y la geomecánica del medio a excavar puede, también con una cierta aproximación, asociarse por un lado con la resistencia de los materiales dominantes en el medio y por el otro lado, en caso de un macizo rocoso, con su macro-estructura (fracturas, alteraciones, anisotropías y morfologías de las superficies de las discontinuidades, entre otros) para identificar y sintetizar la cual se pueden usar diferentes índices de calidad geomecánica, por ejemplo el RMR de Bieniawsky, el Q de Barton, el GSI de Hoek, entre otros (Perri, 2006).

En la bibliografía se encuentran propuestas diferentes subdivisiones y denominaciones para las posibles clases de comportamiento de una excavación, las cuales por lo general recurren a cinco categorías y en tal contexto puede afirmarse que los sistemas VTR encuentran su más comunes aplicaciones dentro de las dos clases más bajas del rango, aunque es posible encontrar un uso provechoso de esta tecnología también en las clases de comportamiento central

donde, para las condiciones más próximas a la siguiente clase inferior, las intervenciones de estabilización pueden llegar a ser parcialmente mejorativas, complementando las clásicas intervenciones conservativas con el refuerzo del frente mediante elementos de vidrioresina con el objeto de rigidizarlo lo suficiente para permitir un aceptable equilibrio temporal de la cavidad hasta tanto entre a actuar el soporte radial después de haberse desarrollado una limitada y por lo tanto aún beneficiosa convergencia de la cavidad.

Pero es seguramente para las excavaciones en las dos clases inferiores de comportamiento donde las VTR encuentran su más útil aplicación donde, debido a las precarias condiciones geomecánicas de los terrenos, el soporte de la excavación además de ser lo suficientemente pesado y debidamente integrado por concreto proyectado fibroreforzado pernos radiales y marcos metálicos, debe ser complementado con el refuerzo del núcleo del frente y, debe eventualmente contemplar adecuadas soluciones técnicas adicionales como por ejemplo, un arco de pre-soporte de la excavación (umbrella arch), un arco invertido provisional o definitivo en avance, etc., dependiendo del nivel de criticidad de cada circunstancia específica. Los elementos de vidrioresinas VTR en tales circunstancias, aplicados para pre-consolidar o pre-confinar el frente del túnel, así como eventualmente también para mejorar radialmente el contorno de la cavidad o el terreno de fundación, pueden representar para tales clases de comportamiento formidables recursos muy útiles y eficaces en contribuir a solventar exitosamente los problemas intrínsecos a la excavación, a la estabilización y al avance de un túnel en condiciones objetivamente difíciles, manteniendo al mismo tiempo aceptables y satisfactorios niveles de seguridad y de productividad.

En cuanto al dimensionado de los sistemas VTR, aunque puede recurrirse a la modelación numérica, es importante para un diseño ejecutivo asignar al aspecto experimental una importancia fundamental: la instrumentación y el sistemático monitoreo del comportamiento real a escala natural de la cavidad, con y sin la presencia del refuerzo VTR del frente, es indispensable para poder entender y poder optimizar el funcionamiento del sistema y su diseño. Sin embargo, existen metodologías de análisis y diseño, algunas más sofisticadas como las numéricas y otras más sencillas como las analíticas, suficientemente experimentadas que bien pueden ser utilizadas, por lo menos en las etapas iniciales del diseño, a los fines de dimensionar un sistema VTR apto para determinadas condiciones y determinados potenciales escenarios constructivos.

Dentro de las más sencillas metodologías de análisis y diseño disponibles, se encuentran las formulaciones que consideran directamente el problema de la estabilidad del frente de excavación y su cálculo a ruptura, asumiendo que dentro del núcleo del frente e inmediatamente arriba del mismo se conforma una porción de terreno que tiende a separarse y penetrar el vacío de la cavidad deslizando sobre una superficie cuya forma es más o menos lineal dependiendo de los alcances del instrumento de cálculo que se quiera utilizar: el manual o el más o menos computarizado. Por ejemplo: Ellsten (1986) y Tamez (1988) hacen referencia a superficies planas; Chambon (1990) y Galfo (1990) hacen referencia a superficie de espiral logarítmica; Panet (1988) y Kova ri (1996) hacen referencia a un esquema tridimensional (Figura 8 - Lunardi, 2006).

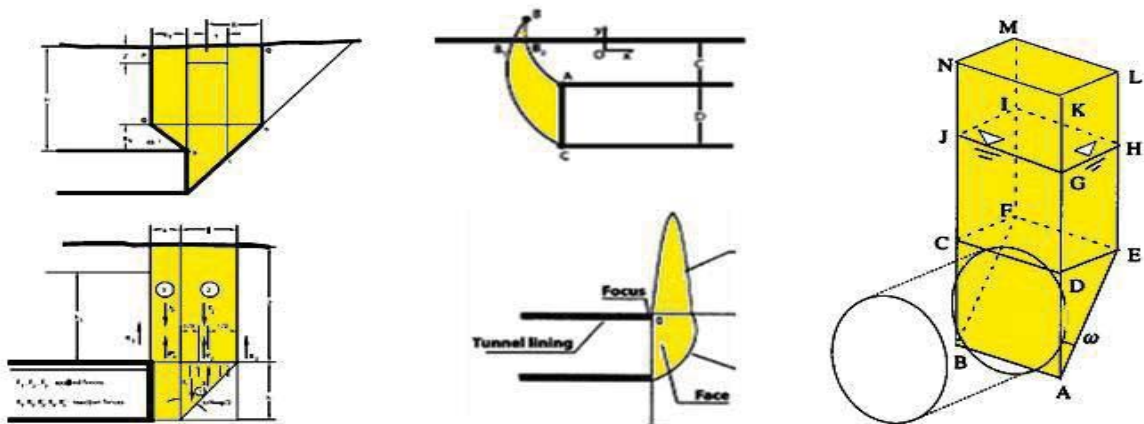


Figura 8 – Modelos simplificados para el análisis de la estabilidad del frente de excavación

CONCLUSIONES

Los sistemas constituidos por elementos estructurales de vidrioresina (VTR) utilizados para rigidizar y estabilizar los frentes de excavación de túneles construidos en condiciones geomecánicas precarias, constituyen un formidable medio para el control de la estabilidad de las obras subterráneas, permitiendo mantener niveles de seguridad y de productividad elevados, aún en condiciones geomecánicas potencialmente críticas o muy críticas.

Existe una gama amplia de tipologías y de tecnologías de tales elementos VTR, lo cual permite en cada caso específico seleccionar el tipo de VTR a utilizar en función de las exigencias técnicas y operativas de la obra a ejecutar.

El diseño de tales sistemas VTR se puede elaborar en las fases iniciales de un proyecto, mediante sencillos métodos analíticos, a partir de la estimación de las características geomecánicas básicas de los terrenos a excavar y conociendo las dimensiones de la sección del túnel y las condiciones de solicitaciones naturales preexistentes en los sitios en que se efectuarán las excavaciones. Luego se podrán ajustar los diseños recurriendo a metodologías de análisis y cálculo más sofisticadas, como son las numéricas, de acuerdo con la importancia y criticidad de la obra y en función de la cantidad y calidad de la información diagnóstica de la cual se disponga. Finalmente, en las fases constructivas se podrá optimizar el diseño y la operación del sistema VTR implementado, mediante la instrumentación y el sistemático monitoreo de las obras en el subterráneo.

Debe finalmente considerarse que por un lado, la adopción de la técnica de los sistemas VTR aplicada en los frentes de excavación de un túnel no siempre por sí sola podrá ser suficiente a garantizar la estabilidad, ya que habrá casos especialmente críticos en los cuales será necesario complementar el ciertamente útil y beneficioso uso de los VTR con alguna otra técnica de consolidación o pre-soporte y que, por otro lado, habrá situaciones no tan críticas en las cuales el uso de los VTR aunque no estrictamente indispensable para mantener la estabilidad, bien puede contribuir a incrementar la seguridad controlando al mismo tiempo los fenómenos deformativos de la cavidad en beneficio de la optimización de los soportes temporales y revestimientos definitivos a colocar en un túnel.

BIBLIOGRAFIA

LUNARDI PIETRO (1985), “*Prima sperimentazione sistematica del consolidamento del nucleo d’avanzamento con VTR nella Galleria Tasso della linea ferroviaria di Alta Velocità Roma Firenze*” Rocksoil Milano.

LUNARDI PIETRO (2006), “*Progetto e costruzione di gallerie*” Hoepli Milano.

PERRI GIANFRANCO (2002), “*Proyecto de túneles: Criterios de diseño*” Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia N° 81 Caracas Venezuela.

PERRI GIANFRANCO (2006), “*Clases de comportamiento y cargas de diseño para túneles excavados convencionalmente*” VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Cartagena Colombia.