

## REFUERZO DEL FRENTE DE EXCAVACIÓN CON ELEMENTOS DE VIDRIO-RESINAS PARA ESTABILIZAR Y AVANZAR A SECCIÓN COMPLETA EN TÚNELES CONSTRUIDOS EN TERRENOS DEBILES

**Gianfranco Perri** Ingeniero Consultor y Proyectista Profesor de Diseño de Túneles en la Universidad Central de Venezuela

### 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 vidrio-resinas 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.*

### Introducción

El "Arte", dentro de la Ingeniería de Túneles, ha ocupado siempre un lugar predominante: desde los orígenes cuando todo era "Arte", hasta los tiempos más modernos en los que la computación y el automatismo más sofisticado aún no han permitido prescindir de una amplia dosis de "Arte" en la adopción de nuevas tecnologías y metodologías para la construcción de las grandes obras subterráneas.

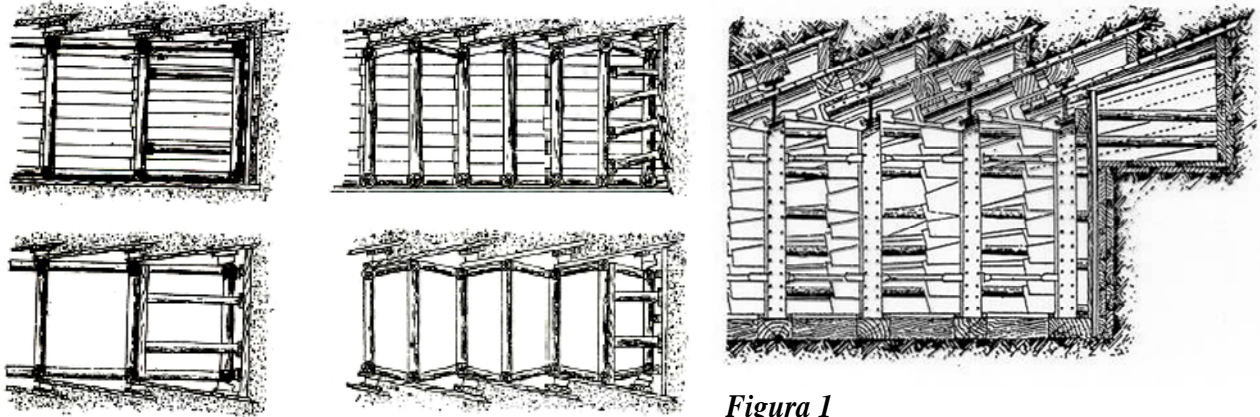
Es así que, dentro del marco descrito, en la construcción de túneles se proponen constantemente soluciones más o menos novedosas, basadas sobre el empirismo y la experiencia en unos casos o sobre la simple evolución de antiguas técnicas en otros, para que sea siempre la práctica a verificar sus cualidades y defectos y solamente entonces por lo general es cuando intervienen la "Ciencia" y las "Teorías" a analizar o corroborar y, esto es cierto, generalmente optimizar el fruto del "Arte", elevándolo a las categorías de "Técnica o Ciencia".

Ha sido dentro de este continuo proceso de innovación tecnológica que, desde hace varios años se ha venido experimentando (inicialmente en Italia hacia mitad de los '80 y luego en muchas otras partes del mundo) en la construcción de túneles excavados en terrenos difíciles en condiciones críticas en relación con la estabilidad de la excavación, 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 lineares, colocados uniformemente distribuidos y paralelos al eje del túnel.

Los referidos elementos estructurales lineares 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.

## Antecedentes

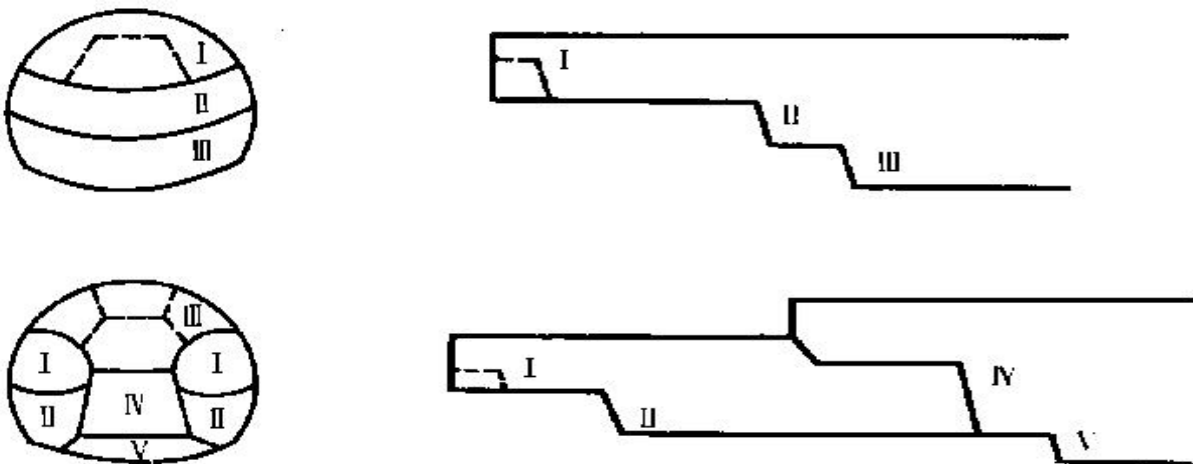
La idea de introducir elementos estructurales paralelos al eje del núcleo de avance de un túnel, con el objeto que los mismos pudiesen aplicar con su reacción una oportuna presión estabilizante sobre el mismo frente de excavación, ciertamente surgió como natural evolución de las más antiguas y comprobadas 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 (Figura 1) 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*

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 austríaco", "Método italiano", Método belga", etc. (Figura 2).

Todos estos métodos se diferenciaban, 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 avanzan 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.



*Figura 2*

Tal manera de proceder no obstante que obviamente resultara muy complicada, lenta, ineficiente y peligrosa, fue de hecho la única posible y en efectos en la práctica fue generalmente adoptada durante más de un siglo para excavar todos los grandes túneles viales y ferroviarios que en Europa y en América se construyeron a partir de los últimos decenios del antepasado siglo 18: absolutamente todos aquellos túneles que se excavaron convencionalmente en terrenos no aptos a ser dinamitados a sección completa.

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 condición de trabajo de los mineros empeñados en construir grandes túneles.

### Principios

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 que 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: aquella cavidad 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 presencia de 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 3) y recientemente publicada en todos sus detalles (Lunardi, 2006).

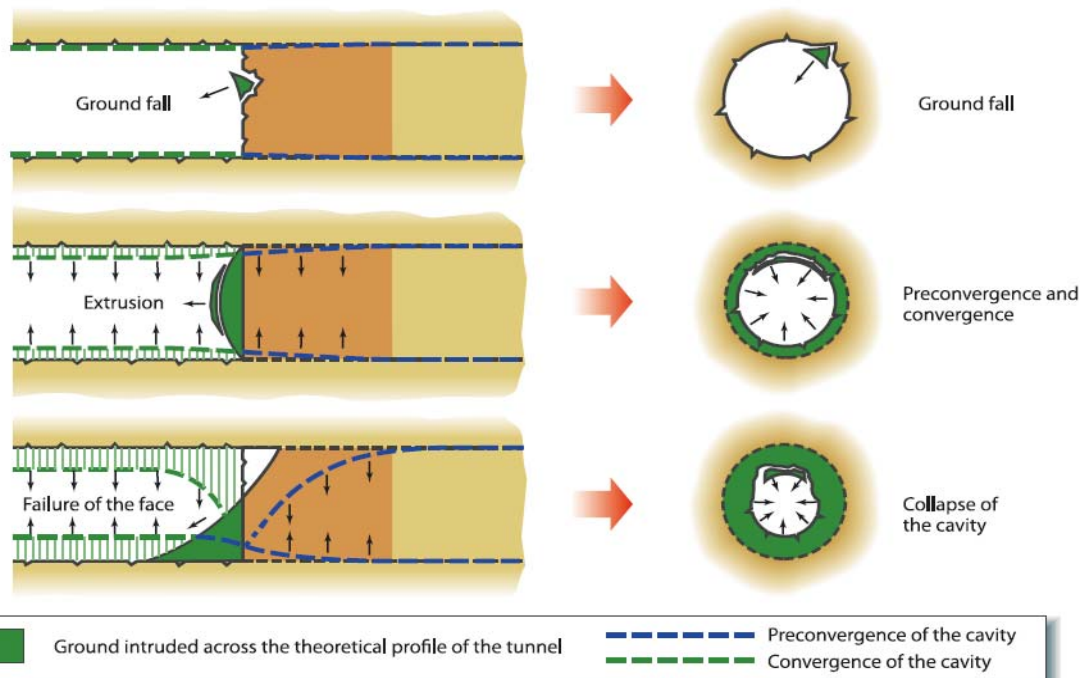


Figura 3

Una vez entendido a fondo el fenómeno y después de haberlo analizado en todos sus detalles, recurriendo para ello también a reiteradas observaciones prácticas y al sistemático monitoreo de numerosos túneles en construcción, el reto naturalmente e inmediatamente consecuente fue la búsqueda de la manera práctica de poder aprovechar tal importante principio para poder controlar en las obras la estabilidad de las excavaciones en túneles construidos en ambientes geomecánicos adversos.

Alcanzar o sea el objetivo de poder excavar túneles, también con secciones de grandes dimensiones, en condiciones de seguridad, con metodologías industrializadas, avanzando a sección plena no obstante la existencia de condiciones geomecánicas precarias.

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. Los resultados, desde un punto de vista del objetivo de mejorar y controlar la estabilidad del frente y de la cavidad adyacente, fueron relativamente satisfactorios y sin embargo, resultaron al mismo tiempo claros también los límites y los serios inconvenientes prácticos implícitos en tales procedimientos.

Los clavos simplemente hincados había que extraerlos inmediatamente antes de reanudar la excavación, mientras los clavos cementados mediante inyección de mortero de cemento, constituían un serio estorbo en las operaciones de abatimiento y excavación del núcleo del frente, especialmente si su longitud había sido extendida a varios metros para incrementar la eficiencia mecánica y operativa de la intervención. Inclusive el recurso a cables metálicos inyectados en sustitución de las barras metálicas, se reveló impracticable.

Pero las ideas y las tecnologías no demoraron a llegar en providencial auxilio de los proyectista y constructores de túneles: los pernos de vidrio-resinas (fibras de vidrio cementadas y moldeadas con resinas sintéticas) 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 alguno en las etapas de abatimiento y excavación del núcleo del frente.

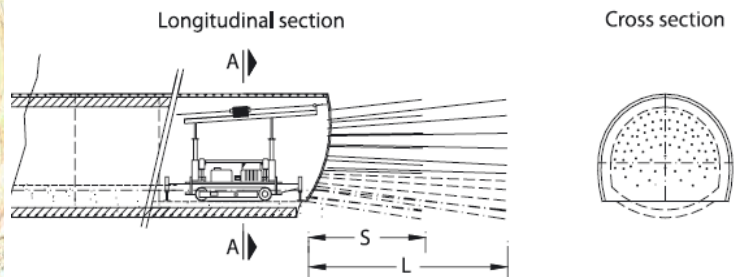
### Primeras aplicaciones

La gran ocasión se le presentó (*Lunardi, 1985*) con la construcción de la ferrovía de alta velocidad entre Roma y Florencia en los Apeninos italianos, 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. Desde allí en adelante, las aplicaciones exitosas de los elementos de vidrio-resinas (VTR) para reforzar y estabilizar el frente de túneles en terrenos difíciles se han multiplicado y difundido enormemente en muchas partes de Europa y América.



following parameters were employed:

Length of each reinforced section:	L = 15 m
Resistant cross section of the fibre glass elements:	$\phi = 60/40$ mm
Intensity of the reinforcement:	I = 0.35 - 0.51 elements/m <sup>2</sup>
Overlap between reinforced sections:	S = 5 m



**Figura 4**  
**Figuras 5**



*Ferrocarril de Alta Velocidad Roma-Florenzia (Italia)*



*Metro Las Adjuntas-Los Teques (Venezuela)*



*Ferrocarril Caracas-Cúa (Venezuela)*



*Single track Tunnels*

**Tecnología de los elementos VTR (Figuras 6)**

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



*Elementos VTR lisos de sección circular*



*Elementos VTR corrugados de sección circular*

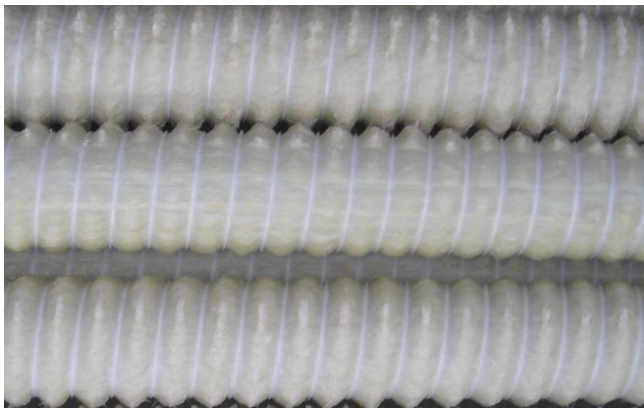
También los tubos VTR fueron inicialmente lisos, luego se mejoró su adherencia al mortero cementante con la incisión de canales helicoidales conformados sobre la superficie cilíndrica externa del tubo mediante el corte de material, y finalmente la tecnología constructiva industrial evolucionó hasta obtener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



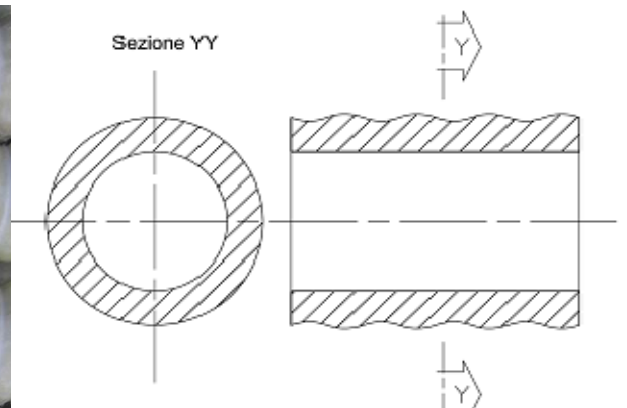
*Elementos VTR de sección anular*



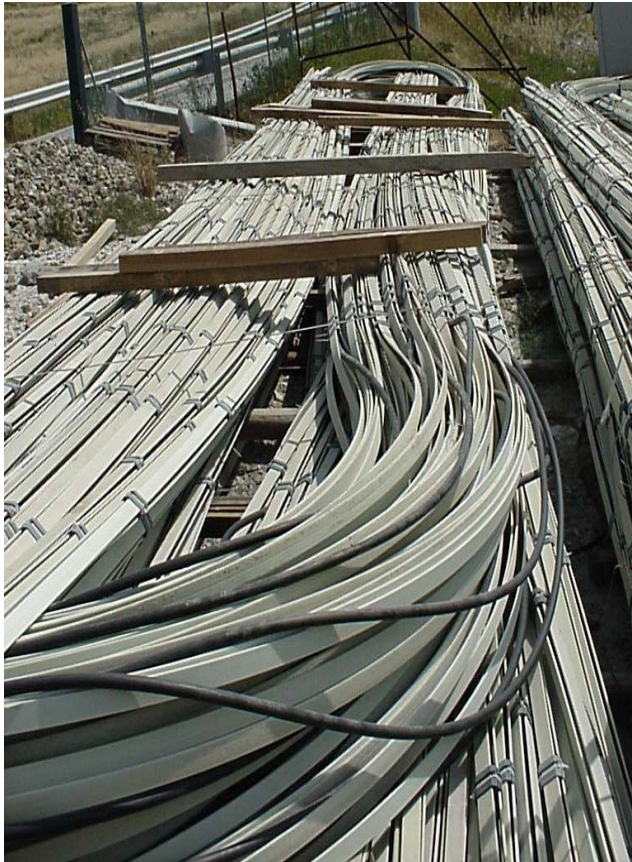
*VTR anular de adherencia mejorada*



*Elementos VTR de sección anular corrugada*



Sucesivamente, se introdujeron y se difundieron también elementos VTR planos a sección rectangular en forma de platinas, cuya gran flexibilidad facilita el transporte en rollos continuos, permitiendo al mismo tiempo la confección en 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 o situación específica.

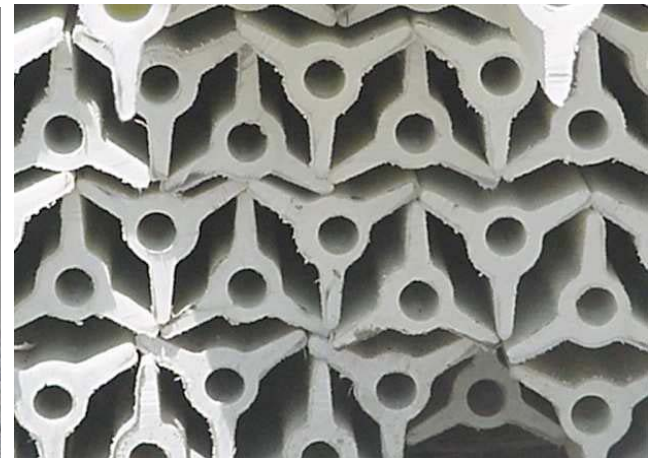


*Elementos VTR de sección rectangular*



*Ensamblados en series de tres*

Y también se han experimentado y utilizado elementos a forma de Y o de Estrella, con agujero central para la inyección o complementados con una manguera plástica separada de inyección, así como necesariamente ocurre en los antes descritos elementos en forma de platinas.



*Elementos VTR con sección a Y o 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, como 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 se trata de elementos VTR aún tubulares, pero complementados con una manga o saco externo constituido por un especial geotextil.



*Elementos VTR tubulares con camisa interna plástica y válvulas de inyección*



*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 siguiendo 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 luego, 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 (ver el capítulo específico).

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 movilizada 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  $\sigma_t$  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  $\sigma_t$  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, por lo general es del orden de las 4 pulgadas o 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.

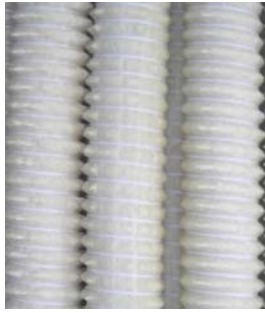
Con todo lo anterior, se puede finalmente llegar a señalar que es la resistencia unitaria al corte entre el concreto y el terreno  $t_{c-t}$  el principal parámetro a determinar explícitamente en cada caso, además de obviamente la geometría de la sección del elemento estructural de vidrio-resina a emplear.

Las características geométricas, de resistencia y de adherencia de todos los varios elementos estructurales de vidrio-resina disponibles en el mercado, se encuentran detalladamente reportadas por los fabricantes en sus catálogos de especificaciones técnicas (ver por ejemplos las tablas reportadas más adelante), 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, 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 de contención movilizable por cada elemento de vidrio-resina que conforma el sistema, está medianamente comprendida entre 10 y 50 toneladas para elementos perforados con un diámetro nominal del orden de 4 pulgadas.

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

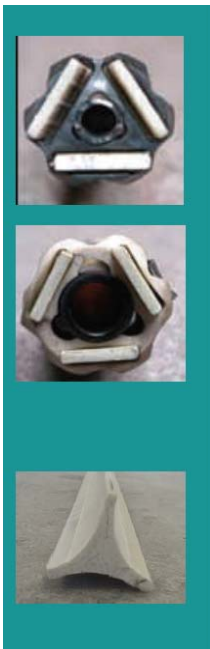
Analizando finalmente las tablas reportadas a continuación, extraídas de algunos catálogos representativos de los más comunes productos estructurales fabricados en de vidrio-resinas, se observa que: -La resistencia unitaria a la tracción  $\sigma_t$  es de entre 500 y 1000 N/mm<sup>2</sup> dependiendo 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 mm<sup>2</sup> con lo cual se obtienen en consecuencia capacidades estructurales de entre 250000 y 1000000 N (25 y 100 toneladas).-La adherencia entre vidrio-resina y concreto  $t_{v-c}$  es del orden de entre 100 y 200 t/m<sup>2</sup> 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.



<b>Products Characteristics</b>						
$\Phi_{ext}$ [mm]	$\Phi_{int}$ [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Tensile Failure $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Perímetro [mm]	Adherence pipe-concrete $t_{v-c}$ [t/m <sup>2</sup> ]	$T_{v-c}/L$ [t/m]
50	40	707	450-600	157	100	16
60	40	1570	450-600	188	150	28
76	40	3278	450-600	239	200	48



<b>Products Characteristics</b>						
Improved Adherence	$\Phi_{ext}$ [mm]	$\Phi_{int}$ [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Tensile failure load [N/mm <sup>2</sup> ]	Tangent modulus of elasticity	Glass % on weight
smooth	42	35	420	-	-	50
	28	23	200	-	-	50
corrugated	50	40	552	450	20.000	50
				600	25.000	60
	56	40	1033	450	20.000	50
				600	25.000	60
	60	40	1384	450	20.000	50
				600	25.000	60
76	40	2927	450	20.000	50	
			600	25.000	60	
standard	60/50	50/40	678	450	20.000	50
				950	32.000	70
	60	40	1205	450	20.000	50
				600	25.000	60
	60	40	1205	950	32.000	70
				600	25.000	60



<b>Products Characteristics</b>						
Shape	Dim. [mm]	Square Section [mm <sup>2</sup> ]	Injection pipe [mm]	Tensile failure load [N/mm <sup>2</sup> ]	Tangent modulus of elasticity [N/mm <sup>2</sup> ]	Glass [%] on weight
Plate	3x40x4	480	20	950	32.000	70
			ETAM 38/27 1V	950	32.000	70
			ETAM 38/27 2V	950	32.000	70
	3x40x5	600	20	950	32.000	70
			ETAM 38/27 1V	950	32.000	70
			ETAM 38/27 2V	950	32.000	70
3x40x6	760	20	950	32.000	70	
		ETAM 38/27 1V	950	32.000	70	
		ETAM 38/27 2V	950	32.000	70	
Y	60	750	-	750	32.000	65
	60	750		950	32.000	70
	60	750		600	25.000	60

**Campos de aplicación de los 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 condiciones de sollicitaciones naturales que resulten considerablemente elevadas en relación con la resistencia del terreno, en primera aproximación puede hacerse directamente referencia a la resistencia a la compresión no confinada del mismo terreno al contorno de la excavación ( $\sigma_{cm}$ ) y ponerla directamente en relación con el estado de sollicitación natural ( $\gamma H$ ), siendo ( $\gamma$ ) la densidad del terreno a través del denominado "Índice de competencia de la excavación" ( $IC = \sigma_{cm} / \gamma H$ ) el cual puede usarse como discriminante de las clases de comportamiento de la excavación. Mientras, para condiciones de valores elevados del referido índice, así como generalmente ocurre a coberturas moderadas donde las condiciones de sollicitaciones naturales resultan naturalmente bajas, puede resultar suficientemente condicionante y discriminante de la clase de comportamiento de la excavación, la sola calidad geomecánica del terreno.

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, aunque no faltan ejemplos de subdivisiones detalladas en menor o mayor grado (ver algunos ejemplos en la tabla).

<i>Clases de comportamiento de una excavación</i>					
<b>Hoek</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Bieniawski</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
<b>Lunardi</b>	<b>A</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
<b>Russo</b>	<b>a/b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>

Haciendo ahora referencia a un rango de cinco posibles clases de comportamiento de la excavación, a continuación se describen brevemente los rasgos más sobresalientes de cada una de aquellas.

- *Clase de comportamiento "A"*

Comportamiento a frente y cavidad estables. Tal clase de comportamiento se produce cuando el estado de sollicitación, que se establece al frente y al contorno de la cavidad como consecuencia de la redistribución de los esfuerzos naturales que sigue a la excavación misma, es tal que los esfuerzos en el medio no superan las características de resistencia del mismo y los fenómenos de deformación que consiguen a la excavación evolucionan manteniéndose en campo elástico, son inmediatos y por lo general de modesto alcance.

Las intervenciones de estabilización son por lo general mínimas y están principalmente dirigidas a evitar localizados desprendimientos del terreno potencialmente peligrosos para las personas y al mismo tiempo a mantener un perfil de excavación regular. En lo que específicamente se refiere al soporte, en esta clase se considera suficiente la eventual puesta en obra de algunos pernos aislados con además una eventual capa poco espesa de concreto proyectado fibroreforzado.

- *Clase de comportamiento “B”*

Comportamiento a frente estable y cavidad estable a corto plazo. Tal clase de comportamiento se produce cuando el estado de sollicitación, que se establece al frente y al contorno de la cavidad como consecuencia de la redistribución de los esfuerzos naturales que sigue a la excavación misma, es tal que los esfuerzos en el medio se acercan a la resistencia elástica del mismo y los fenómenos de deformación que consiguen a la excavación evolucionan en campo elástico en el frente y en campo elasto-plástico sobre el contorno de la cavidad, son algo diferidos y son por lo general de limitado alcance.

Las intervenciones de estabilización son de tipo conservativo basadas en técnicas de contraste pasivo, o sea dirigidas a evitar el completo de-confinamiento del terreno en el contorno de la cavidad y su descompresión más allá del mismo contorno. En lo que específicamente se refiere al soporte, en esta clase se considera apropiada la puesta en obra de un sistema compuesto por la integración de una capa de concreto proyectado fibroreforzado de moderado espesor, con pernos, capaz de contrastar con adecuado margen de seguridad las limitadas cargas radiales del terreno.

- *Clase de comportamiento “C”*

Comportamiento a cavidad inestable. Tal clase de comportamiento se produce cuando el estado de sollicitación que se establece al frente y al contorno de la cavidad como consecuencia de la redistribución de los esfuerzos naturales que sigue a la excavación misma, es tal que los esfuerzos en el medio superan por poco las características de resistencia elástica del mismo y los fenómenos de deformación que consiguen a la excavación evolucionan en campo elasto-plástico sobre el frente y el contorno de la cavidad, se desarrollan lentamente en relación a las normales velocidades de avance de la excavación y aunque no se producen evidentes derrumbes del frente debido al moderado desequilibrio tensional, las deformaciones axiales del núcleo (extrusiones) pueden eventualmente condicionar la estabilidad del túnel.

Las intervenciones de estabilización es aún posible que puedan ser solo de tipo conservativo pero, en lo que específicamente se refiere al soporte, en esta clase se requiere instalar estructuras de contraste suficientemente pesadas para soportar las ya importantes cargas radiales del terreno y constituidas por una capa de concreto proyectado fibroreforzado de buen espesor integrada a un denso esquema de pernos radiales o, alternativamente, integrada a adecuados marcos metálicos.

Inclusive, para las condiciones más críticas de esta misma clase, las intervenciones de estabilización pueden llegar a ser parcialmente mejorativas, complementando las descritas intervenciones conservativas con el refuerzo del frente mediante elementos de vidrio-resina 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.

- *Clase de comportamiento “D”*

Comportamiento a frente inestable. Tal clase de comportamiento se produce cuando el estado de sollicitación que se establece al frente y al contorno de la cavidad como consecuencia de la redistribución de los esfuerzos naturales que sigue a la excavación misma, es tal que los esfuerzos en el medio superan las características de resistencia del mismo y los fenómenos de deformación evolucionan rápidamente en campo de ruptura dando lugar a graves manifestaciones de inestabilidad tales como la caída del frente y el posible colapso de la cavidad, sin dejar tiempo suficiente para actuar con las intervenciones de contención

radial y las deformaciones axiales del núcleo (extrusiones) son relevantes y condicionan la estabilidad del túnel pudiendo inducir al colapso.

El soporte primario debe ser suficientemente pesado y estar constituido por una espesa capa de concreto proyectado fibroreforzado y pesadas costillas metálicas eventualmente integradas con la aplicación de elementos radiales de mejora del terreno los cuales podrán ser de vidrio-resina, o podrán ser cables o pernos estructuralmente equivalentes, dependiendo de la factibilidad práctica de su colocación en relación con la densidad y longitud que resulten necesarias.

Pero antes de la instalación del soporte, es también necesario actuar a monte del frente de avance con intervenciones mejorativas de pre-consolidación y pre-contención para limitar el desarrollo de la plastificación más allá del frente de la excavación en sentido radial, resultando para ello muy eficaz el refuerzo del núcleo del frente con elementos de vidrio-resina.

Inclusive, para las condiciones más críticas de esta misma clase, las intervenciones pueden llegar a ser predominantemente mejorativas y a tal fin la consolidación del frente mediante elementos de vidrio-resina se puede extender en el inmediato estrado del perímetro de la excavación, mediante la colocación de una serie de elementos de vidrio-resina periféricos y algo inclinados respecto al eje del túnel para de tal manera afectar, con la acción mecánica de la armadura de pre-consolidación, una corona de terreno inmediatamente externa al perímetro de excavación, contribuyendo de tal forma a limitar la extensión del radio de plastificación alrededor de la excavación y en consecuencia también limitar las cargas finales de equilibrio sobre el soporte del túnel.

- *Clase de comportamiento “E”*

Comportamiento totalmente inestable. Tal clase de comportamiento se produce cuando el estado de sollicitación, que se establece al frente y al contorno de la cavidad como consecuencia de la redistribución de los esfuerzos naturales que sigue a la excavación misma, es tal que los esfuerzos en el medio superan ampliamente las características de resistencia del mismo, con inmediatas y amplias deformaciones que inevitablemente producen a corto plazo inestabilidades en el frente y consecuentes colapsos en la cavidad.

Tal comportamiento es, por ejemplo, típico de los terrenos incoherentes o poco cohesivos, de los macizos rocosos cataclasados como en las zonas de fallas, o de la presencia de fuertes gradientes hidráulicos, o de todos modos en los casos en donde desequilibrios tensionales muy elevados determinan la inmediata inestabilidad del frente al momento mismo de la abertura de la cavidad.

Debido a las precarias condiciones geomecánicas de los terrenos, el soporte a instalar en esta clase de comportamiento de la excavación, además de ser lo suficientemente pesado y debidamente integrado por concreto proyectado fibroreforzado pernos radiales y marcos metálicos, como en la clase anterior debe ser complementado con el refuerzo del núcleo del frente y además, debe contemplar adecuadas soluciones técnicas complementarias como por ejemplo, un arco de pre-soporte de la excavación (umbrella arch), un tratamiento mejorativo del terreno de fundación de los marcos, un arco invertido provisional o definitivo en avance, etc., dependiendo de cada circunstancia específica

Los elementos de vidrio-resinas VTR, aplicados para pre-consolidar o pre-confinar el frente y la bóveda del túnel, así como para mejorar radialmente el contorno de la cavidad o el terreno de fundación, pueden representar en tal clase 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, y manteniendo al mismo tiempo aceptables y satisfactorios niveles de seguridad y de productividad.

## **Diseño de Sistemas VTR**

El profesor Lunardi (2006) ha tratado ampliamente y detalladamente el tema relativo al diseño de los sistemas VTR para el refuerzo o consolidación del frente durante la excavación de un túnel, analizando el fenómeno y las correspondientes problemáticas en todo sus detalles teóricos y experimentales, asignando 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.

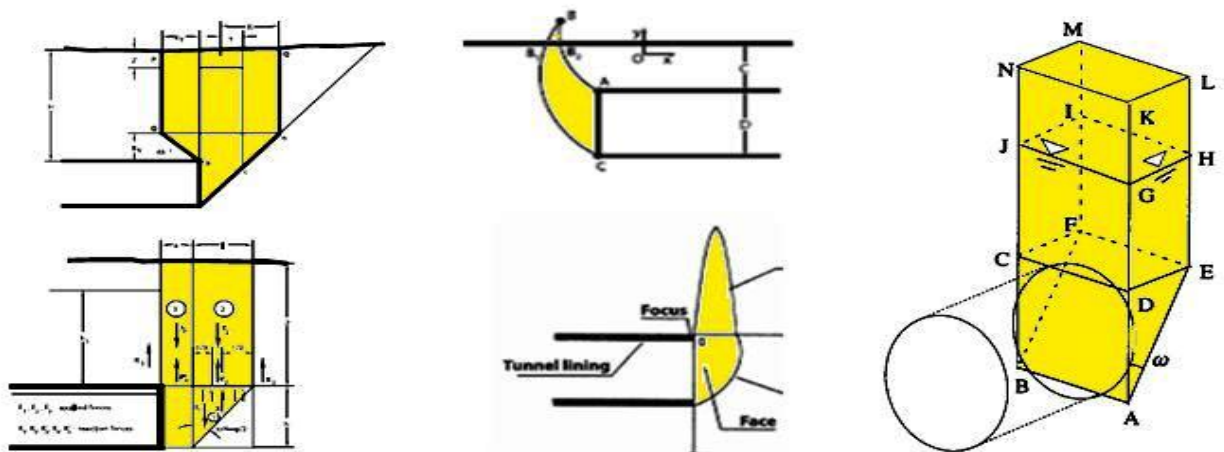
Sin embargo existen metodologías de análisis y diseño, algunas más sofisticadas como las numéricas y otras más sencillas como las analíticas, suficientemente experimentadas que bien pueden ser utilizadas, por lo menos en las etapas iniciales del diseño, a los fines de dimensionar un sistema VTR apto para determinadas condiciones y determinados potenciales escenarios constructivos.

En el capítulo anterior, relativo a la definición y caracterización de las posibles clases de comportamiento de una excavación se ha comentado como el uso provechoso de los sistemas VTR deba obviamente limitarse a las solas clases de comportamiento críticas, tales como ciertamente lo son aquellas que en general se identifican como Clases 4 o 5, o como potencialmente pueden serlo las que en general se identifican como Clase 3, en algún tipo de clasificación que emplee un total de cinco categorías.

Y por lo tanto, aunque la clase de comportamiento de una excavación depende también de las dimensiones y forma de la sección de excavación y del nivel del estado de tensiones naturales preexistente en el lugar de las excavaciones, se trata en términos generales de excavaciones que se realizan en terrenos de características geomecánicas precarias (Perri, 2006): suelos a carácter predominantemente granular o predominantemente cohesivo, rocas débiles en general, o rocas alteradas, o meteorizadas, o muy fracturadas, o tectonizadas.

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 conforme 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 Kovari (1996) hacen referencia a un esquema tridimensional (Figura 6 - Lunardi, 2006).



**Figura 6**

Para estimar la presión de estabilización que se requiere aplicar horizontalmente sobre el frente de excavación de túneles poco profundos, o sea con coberturas de hasta un par de veces el ancho de la sección,

excavados en medios que desarrollan cohesión y que en general muestren un comportamiento macroscópicamente homogéneo e isótropo, se puede recurrir a una formulación relativamente simple y directa que parte de la definición del Factor de Estabilidad del Frente (N), según originalmente propuesta por Peck:

$$N = (P_o - P_e) / c$$

Siendo  $P_o$  la presión externa litoestática en el centro del túnel, igual al peso unitario del terreno  $\gamma$  por la profundidad del centro del túnel ( $H+R_o$ , si  $H$  es la cobertura y  $R_o$  el radio del túnel) y siendo  $P_e$  la presión interna (horizontal) actuante sobre el frente (Figura 7).

La cohesión  $c$  del terreno se obtendrá de los correspondientes ensayos de laboratorio en los suelos de carácter predominantemente arcilloso, mientras para los terrenos rocosos se podrá estimar a partir de la resistencia a la compresión no confinada de los materiales rocosos involucrados y en función de la naturaleza litológica de los mismos y del valor que tenga el índice geomecánico GSI de Hoek del macizo rocoso (Perri, 2002).

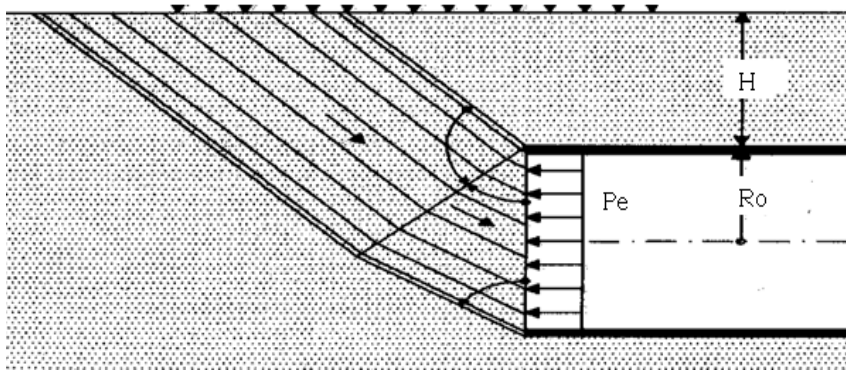


Figura 7

Cuando la cobertura del túnel es más elevada, aún se puede recurrir en principio a la misma formulación considerando que  $P_o$  sea la presión correspondiente a la carga vertical actuante sobre el techo del túnel consecuente al establecimiento de un sólido de cargas, de acuerdo con la teoría de Terzaghi:

$$P_o = \gamma H_p \text{ con } H_p = \alpha (B_t + H_t)$$

Siendo  $B_t$  y  $H_t$  respectivamente el ancho y el alto de la sección de excavación del túnel y siendo  $\alpha$  el coeficiente de carga de Terzaghi (Perri, 2002).

Peck afirma que  $N$  no debe exceder el valor de 5 para evitar inestabilidades del frente del túnel en excavación, lo cual implica que en ausencia de presiones de estabilización horizontales sobre el frente ( $P_e=0$ ), el frente estaría en equilibrio límite en un medio a excavar que pueda desarrollar una cohesión del orden de  $1/5$  de la presión vertical actuante ( $P_o$ ).

El Factor de Seguridad del Frente ( $FS_f$ ), relacionado al previamente definido Factor de Estabilidad del Frente ( $N$ ), resulta por lo tanto igual a  $5/N$ :

$$FS_f = 5 c / (P_o - P_e)$$

Luego, la presión de estabilización ( $P_e$ ) requerida para garantizar un determinado factor de seguridad es:

$$\begin{aligned} P_e &= \gamma (H + R_o) - 5 c / FS_f && \text{para túneles superficiales} \\ P_e &= \gamma \alpha (B_t + H_t) - 5 c / FS_f && \text{para túneles profundos} \end{aligned}$$



A manera de ejemplo, aplicando la primera de las indicadas fórmulas de la presión de estabilización del frente con un factor de seguridad igual a 1.25, para un radio del túnel igual a 5 metros y para un peso unitario medio del terreno de  $2 \text{ t/m}^3$ , se obtienen los valores de la presión de estabilización reportados en la siguiente tabla, en función de la cobertura del túnel y de la cohesión que se pueda desarrollar en el terreno involucrado.

***Presión de estabilización sobre el frente Vs. cobertura y tipo de Terreno***

<b>Presión (<math>\text{t/m}^2</math>) de estabilización sobre el frente para FSf = 1.25</b>						
<b>c (<math>\text{t/m}^2</math>):</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>H (m)</b>						
<b>10</b>	<b>30</b>	<b>22</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>32</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>0</b>
<b>20</b>	<b>50</b>	<b>42</b>	<b>34</b>	<b>26</b>	<b>18</b>	<b>10</b>
<b>25</b>	<b>60</b>	<b>52</b>	<b>44</b>	<b>36</b>	<b>28</b>	<b>20</b>

Una vez que se haya obtenido la presión de estabilización que es necesario aplicar sobre el frente, se puede pasar al cálculo de la cantidades de elementos VTR que se deben colocar, para lo cual bastará dividir la carga estabilizante total necesaria (a su vez igual a  $P_e$  por el área de la sección del túnel) entre la carga unitaria que puede desarrollar cada elemento VTR, seleccionando esta última en función de las características tecnológicas de los VTR que se utilizarán y de las características geotécnicas del terreno.

También será necesario tomar en debida cuenta consideraciones de orden práctico en relación con las posibles densidades a aplicar en la distribución, más o menos uniforme, de los elementos VTR calculados y en este sentido, en principio, deberán utilizarse separaciones medias entre elementos comprendidas dentro de un rango que va desde un mínimo de 1 metro (1 elemento VTR por cada  $\text{m}^2$  de sección del frente) hasta un máximo de 2 o 2.5 metros (1 elemento VTR cada 4 o  $6 \text{ m}^2$  de sección del frente).

Volviendo nuevamente al ejemplo, las cuantías de elementos de vidrio-resinas a ser en principio colocados uniformemente distribuidos dentro la sección del túnel, para un área de la sección de excavación de aproximadamente  $85 \text{ m}^2$  y elementos de VTR trabajando nominalmente a solamente 30 toneladas, resultan las siguientes:

***Cuantías de Vidrio-resinas sobre el Frente Vs. Cobertura y tipo de Terreno***

<b>Cuantía de Vidrio-resinas sobre el frente para FSf = 1.25</b>						
<b>c (<math>\text{t/m}^2</math>):</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>H (m)</b>						
<b>10</b>	<b>83</b>	<b>61</b>	<b>39</b>	<b>17</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>15</b>	<b>111</b>	<b>89</b>	<b>66</b>	<b>44</b>	<b>22</b>	<b>0</b>
<b>20</b>	<b>138</b>	<b>116</b>	<b>94</b>	<b>72</b>	<b>50</b>	<b>28</b>
<b>25</b>	<b>166</b>	<b>144</b>	<b>122</b>	<b>100</b>	<b>77</b>	<b>55</b>

La metodología de cálculo muy simple y extremadamente simplificada que se ha descrito, cumple esencialmente con el objetivo de ilustrar los conceptos básicos involucrados y es por lo tanto necesario advertir que la misma solamente puede ser empleada para llevar a cabo estimaciones preliminares, recomendándose para las fases más avanzadas de un proyecto recurrir a análisis y cálculos más sofisticados y sobre todo a la implementación de un adecuado procedimiento de monitoreo en obra al fin de luego optimizar el diseño y la implementación en cada caso específico del Sistema VTR.

## Conclusiones

Los sistemas constituidos por elementos estructurales de vidrio-resina 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 numéricos, 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, de acuerdo con la importancia y criticidad de la obra y con el nivel y cantidad de 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 aplicados 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.

## Bibliografía

- Lunardi Pietro: *Prima sperimentazione sistematica del consolidamento del nucleo d'avanzamento con VTR nella Galleria Tasso della linea ferroviaria di Alta Velocità Roma Firenze* Rocksoil Milano, 1985.
- Lunardi Pietro: *Progetto e costruzione di gallerie* Hoepli Milano, 2006.
- Perri Gianfranco: *Proyecto de túneles: Criterios de diseño* Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia N° 81. Caracas Venezuela, Enero 2002.
- Perri Gianfranco: *Clases de comportamiento y cargas de diseño para túneles excavados convencionalmente* VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Cartagena Colombia, 8-13 Octubre 2006.