

UN MÉTODO CONSTRUCTIVO INNOVADOR PARA TÚNELES BASADO EN CONTROLAR LAS DEFORMACIONES DEL FRENTE

Gianfranco Perri

Caracas - Venezuela

gianfrancoperri@gmail.com

RESUMEN. El oportuno control y la correspondiente minimización de las deformaciones que inevitablemente se producen alrededor de las excavaciones subterráneas, constituyen la base conceptual de un innovador método de diseño y construcción de túneles, gracias al cual es posible excavar túneles de manera segura eficiente y rápida, avanzando siempre a sección completa, también con secciones eventualmente grandes y en terrenos geotécnicamente difíciles. Para controlar las deformaciones, limitando su desarrollo primario y garantizando al mismo tiempo la estabilidad del frente de excavación y por consecuencia la de la cavidad próxima, se recurre a la consolidación o refuerzo sistemático del núcleo del frente, mediante elementos estructurales generalmente tubulares de vitrosinas, los cuales son sistemáticamente introducidos en agujeros e inyectados con lechada a baja presión dispuestos paralelos al eje del túnel y uniformemente distribuidos sobre la sección, con longitud del orden de un par de veces el ancho de la sección de excavación y en cantidad variable en función de las características geotécnicas del medio en que se está excavando y de las tensiones naturales existentes en el mismo. La experiencia exitosa de la implementación de tal concepto y tal tecnología, ya ha cumplido algunas decenas de años y se está rápidamente difundiendo en Europa y más recientemente también en otras regiones del mundo. En este trabajo se presentan los conceptos, las tecnologías y los resultados.

INTRODUCCION

Partiendo de la meticulosa observación del comportamiento de las obras subterráneas excavadas en condiciones potencialmente críticas, el profesor Pietro Lunardi con mucha experiencia en el diseño de túneles y con una buena dosis de intuición ingenieril, hace más de unos veinte años ha iniciado a experimentar, bien sea con análisis teóricos y bien sea con aplicaciones y monitoreos de campo, una nueva manera de concebir el diseño y la construcción de túneles, hasta llegar con los años a la definitiva formulación y sistemática exitosa aplicación de una nueva metodología, la cual desde Italia se ha ido difundiendo en muchos otros países de Europa, como por ejemplo en Francia, y más recientemente también en América, del Norte y del Sur.

El método en cuestión, que debe ser más bien considerado una filosofía de diseño y construcción, está basado en el análisis y control de las deformaciones en el frente y contorno de la excavación. El método en efectos, a diferencia de los enfoques tradicionales, se centra en el rol central y fundamental que juegan las deformaciones iniciales que se producen en el medio cuando el mismo es afectado por una excavación subterránea.

Las deformaciones son en realidad la verdadera respuesta o reacción que produce el medio a la acción de excavación y es en aquellas que es por lo tanto necesario concentrar la atención para entenderlas a fondo y en todo su detalle, desde su surgimiento y luego a través de toda su evolución (Fig. 1).

El medio en el que se excava es el principal material de construcción del túnel, se encuentra naturalmente sujeto a sollicitaciones triaxiales que son consecuencias de las cargas

litoestáticas de varios y a veces complejos orígenes geológicos, y la acción de excavar causa la perturbación de tales condiciones naturales en el medio próximo al avance, afectando su estado de sollicitación natural, bien sea en su componente longitudinal que en las transversales al eje de avance de la excavación.

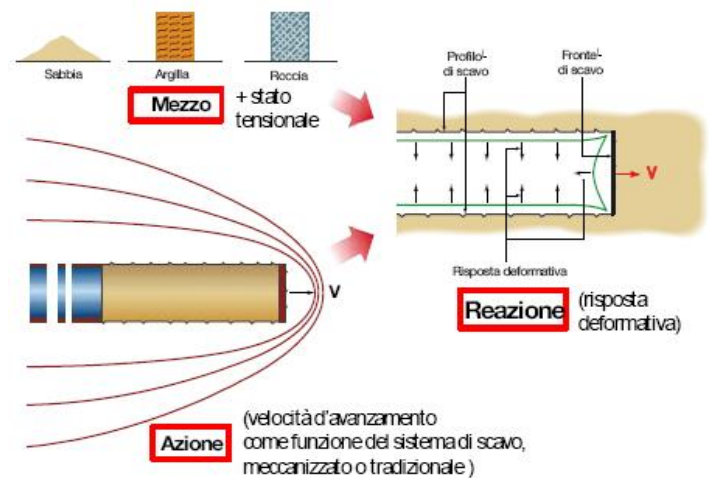


FIG. 1 Risposta deformatoria de la excavación

En este orden de ideas, especial atención se le debe prestar al núcleo de avance (Fig. 2), que se define como el volumen de terreno que está aguas arriba del frente de excavación, de forma casi cilíndrica y dimensiones transversales y longitudinal del orden del diámetro del túnel: la llegada de la excavación produce en el estado de sollicitación de este núcleo cambios graduales, desde un estado triaxial a uno biaxial, y como resultado de esta alteración puede producirse un comportamiento estable, o estable

solo en el corto plazo, o inestable. Lo anterior, en función de la magnitud de las cargas litoestáticas y también de la velocidad del avance, la cual está a su vez estrechamente vinculada al método de excavación utilizado: una velocidad de avance relativamente elevada reduce la propagación de la perturbación incidiendo positivamente sobre la respuesta deformatoria del medio en su conjunto.

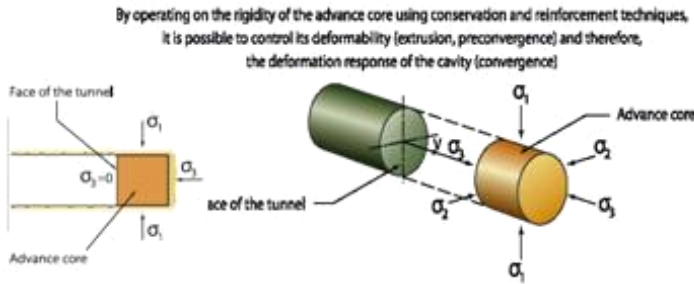


FIG. 2 Cambios tensionales en el núcleo de avance

Contrariamente a la visión tradicional y demasiado simplista que identifica la respuesta del medio en la sola convergencia de la sección excavada, la real respuesta deformatoria del medio incluye tres diferentes componentes básicas (Fig. 3):

- la extrusión, identificada como la componente primaria, se desarrolla en gran medida dentro del cuerpo del núcleo y se manifiesta en correspondencia de la superficie expuesta del frente en el sentido del eje longitudinal del túnel, se puede perfectamente medir experimentalmente con instrumentos que se insertan en un agujero perforado desde el frente en el eje del túnel;
- la preconvergencia, identificada como la componente secundaria, se desarrolla sobre el perímetro teórico de la sección a excavar inmediatamente aguas arriba del frente, se evalúa analíticamente o numéricamente mediante adecuados algoritmos;
- la convergencia, identificada como la tercera componente, se desarrolla la sobre el perímetro de la excavación aguas abajo del frente, se puede medir fácilmente con instrumentos ópticos o mecánicos.

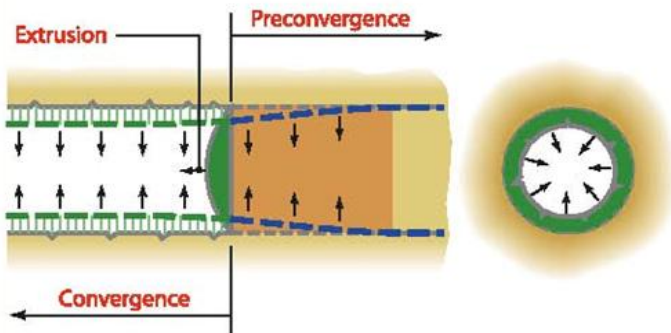


FIG. 3 Extrusión - Preconvergencia - Convergencia

La convergencia por lo tanto, es sólo la última etapa de un fenómeno de deformación muy complejo, que se origina aguas arriba del frente de la excavación en la forma de la extrusión del núcleo y, pasando por la preconvergencia, progresa hasta evolucionar aguas abajo del mismo con la conocida convergencia de la cavidad.

CONTROL DE LA RESPUESTA DEFORMATORIA

Contrariamente a los métodos tradicionales, que consideran resolver los problemas críticos de estabilidad parcializando la sección del túnel y aplicando pernos, costillas, concreto proyectado y soleras más o menos provisionales, actuando dentro de la cavidad solamente aguas abajo del frente de excavación, el método de Lunardi, avanzando siempre a sección completa, estabiliza la excavación interviniendo sobretudo en el terreno aguas arriba del frente de excavación, o sea sobre el núcleo de excavación (Fig. 4).

Para tal fin se utiliza como principal instrumento de control el mismo núcleo de excavación aguas arriba del frente, reforzándolo adecuadamente y protegiéndolo si necesario, mientras aguas abajo del frente se recurre al eventual cierre del fondo excavación con un arco de solera.

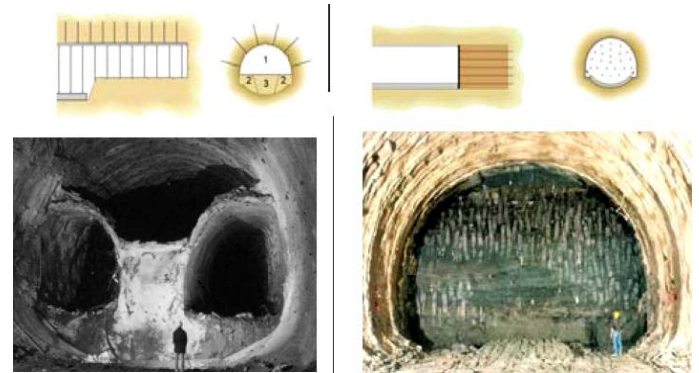


FIG. 4 Diferencias entre lo tradicional y lo innovador

Efectivamente, actuando sobre la rigidez del núcleo de avance, mediante la implementación de adecuadas intervenciones de confinamiento protección y refuerzo, se evita que la llegada del frente de excavación anule por completo la tensión principal (σ_3) de confinamiento longitudinal y por lo tanto que el núcleo pase de un estado de sollicitación triaxial a uno biaxial, pudiendo de esta manera controlar la deformación del núcleo, su extrusión y la consecuente preconvergencia ...y, naturalmente y automáticamente la convergencia de la cavidad.

En efectos, repitiendo el concepto, la convergencia representa el último estadio de un proceso deformatorio muy complejo que surge aguas arriba del frente de excavación y la misma, vinculada a plastificación del terreno alrededor de la cavidad, es muy difícil de controlar e imposible de hacer retroceder una vez que haya alcanzado una magnitud significativa.

Es por lo anterior que la filosofía innovadora aquí expuesta, considerando la verdadera génesis y la evolución de la respuesta deformatoria de una excavación subterránea, concentra todos los esfuerzos en el control de la extrusión del núcleo, siendo tal fenómeno la fuente primaria de todo el proceso deformatorio. Si la extrusión es convenientemente mantenida dentro del rango elástico, el proceso evoluciona hacia fenómenos de preconvergencia y de convergencia ciertamente limitados y posiblemente también dentro del rango elástico, lo que finalmente permite también reducir las cargas sobre los soportes.

Ahora bien, en términos generales los macro escenarios frente a los cuales puede encontrarse una excavación subterránea, se resumen de manera simplificada con referencia a las siguientes tres posibles categorías de excavación (Fig. 4):

- Clase A con comportamiento estable del frente de excavación y del núcleo de avance.
- Clase B con comportamiento estable a corto plazo del frente de excavación y del núcleo de avance.
- Clase C de comportamiento inestable del frente de excavación y del núcleo de avance.

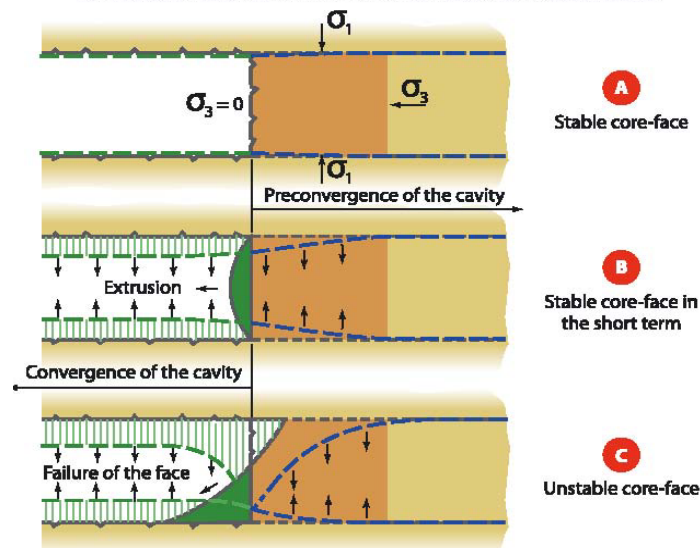


FIG. 5 Clases de comportamiento de una excavación

Entonces, dentro del contexto conceptual ilustrado, es evidente que para estabilizar a corto y largo plazo un túnel durante la excavación, las Clases de comportamiento B y C deben ser reconducidas a la Clase A interviniendo para ello, en primer lugar, sobre la rigidez confinamiento y estabilidad del núcleo de avance.

TECNOLOGÍAS DEL CONTROL DEFORMATORIO

Aunque existen otros métodos potencialmente útiles, por ejemplo el jet grouting, se ha comprobado que la manera más eficiente y efectiva para reforzar un núcleo de avance insuficientemente competente, rigidizándolo y confinándolo, es mediante la utilización de elementos estructurales compuestos de fibras de vidrio amalgamadas con resinas sintéticas.

En efectos ha sido justamente gracias al desarrollo de esta tecnología que la idea del control del fenómeno deformatorio de las excavaciones subterráneas se ha podido convertir en una gran realidad en la construcción de túneles críticos.

Lunardi lo comprobó por primera vez en el 1985 durante la excavación un túnel hidráulico de solamente 5 metros de diámetro, construido para encausar el arroyo Citronia en Salsomaggiore Terme y luego utilizó las vitrosesinas con gran éxito en la excavación a sección completa de túneles en terrenos blandos y dimensiones cada vez más grandes, de hasta más de más de 20 m de diámetro, cómo a ejemplo en el caso del túnel Appia Antica en Roma (Fig. 6).

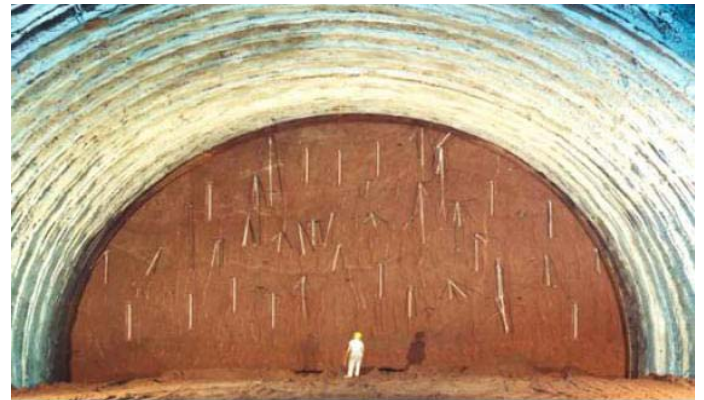


FIG. 6 Refuerzo del núcleo con vitrosesinas en el túnel Appia Antica de 20,65 m de diámetro y 18 m de cobertura excavado a sección plena

En adelante, las aplicaciones exitosas de los elementos de vitrosesinas para reforzar y estabilizar el frente de túneles en terrenos difíciles se han multiplicado y difundido enormemente en muchas partes de Italia Europa y América (Figs. 7).



Fig. 7 Túnel Coruma del Ferrocarril Caracas-Cúa



Un laboratorio interesantísimo lo constituyeron los túneles de la línea ferroviaria de alta velocidad construida entre Bologna y Firenze 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 70 kilómetros de excavaciones subterráneas: 9 túneles principales con 140 m² de sección de excavación y longitudes comprendidas entre 528 y 16775 metros.

En cuanto a las tecnologías de los elementos de vitroresinas (Figs. 8 y 9), 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 al terreno. También los tubos 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 obteniendo una adherencia aún mejorada pero arrugando las mismas fibras sin operar su corte.



Fig. 8a Elementos VTR lisos de sección circular



Fig. 8b Elementos VTR corrugados de sección circular



Fig. 8c Elementos VTR tubulares

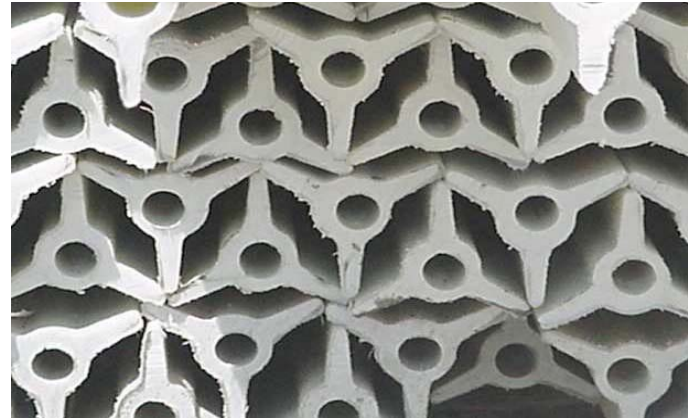


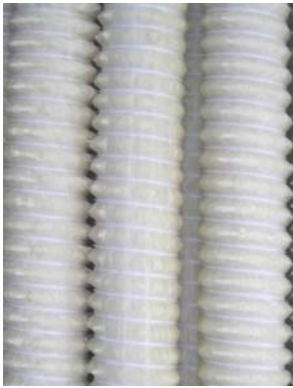
Fig. 8d Elementos VTR de sección en Y o a estrella

Sucesivamente, se introdujeron también elementos 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 (Figs. 9).



Fig. 8e Elementos VTR de sección rectangular

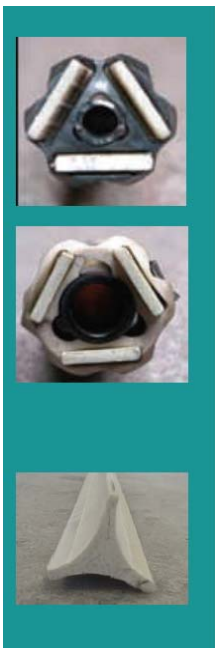
Finalmente y más recientemente, también se han incorporado al mercado diferentes elementos de vitroresinas especiales, o sea con características específicamente adaptadas para aplicaciones en condiciones no rutinarias, como por ejemplo las que requieren de elevadas presiones de inyección con eventual 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 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 aún tubulares, pero complementados con una manga o saco externo constituido por un especial geotextil (Figs. 10).



Products Characteristics						
Φ_{ext} [mm]	Φ_{int} [mm]	Area [mm ²]	Tensile Failure σ_t [N/mm ²]	Perímetro [mm]	Adherence _{pipe-concrete} t_{v-c} [t/m ²]	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



Products Characteristics						
Improved Adherence	Φ_{ext} [mm]	Φ_{int} [mm]	Area [mm ²]	Tensile failure load [N/mm ²]	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



Products Characteristics						
Shape	Dim. [mm]	Square Section [mm ²]	Injection pipe [mm]	Tensile failure load [N/mm ²]	Tangent modulus of elasticity [N/mm ²]	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

Fig. 9 Ejemplos de las características básicas de los elementos VTR



Fig. 10a Elementos VTR tubulares reforzados y valvulados



Fig. 10b Elementos VTR tubulares con geotextil externo para controlar el volumen de inyección y la adherencia

Existen sin embargo escenarios críticos en grado extremo, por ejemplo de excavaciones con grandes dimensiones bajo coberturas muy reducidas en terrenos muy blandos e incompetentes y eventualmente debajo de un nivel freático, para los cuales es necesario complementar las acciones de refuerzo del núcleo del frente con otras acciones protectoras del mismo.

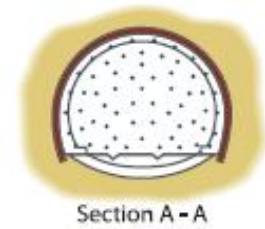
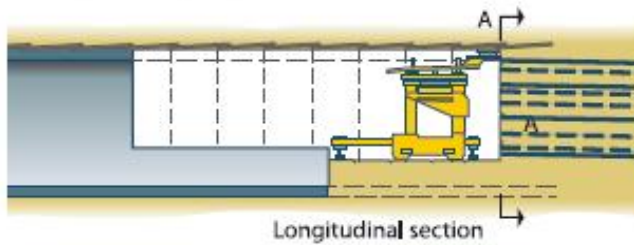
El objetivo principal a cumplir con tales intervenciones protectoras del núcleo de avance, es producir una canalización de las presiones litoestáticas para conducir las en buena parte afuera del núcleo mismo, descargándolo parcialmente de las

mismas y contribuyendo finalmente a controlar su deformación y extrusión.

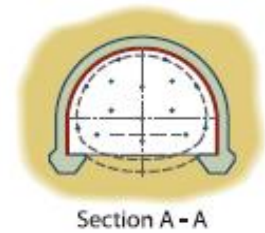
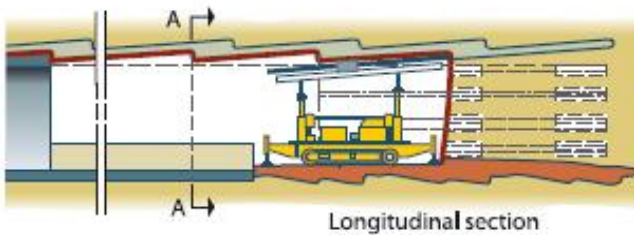
Existen para ello diferentes técnicas ya ampliamente experimentadas, también llamadas de pre-soporte, cuales son por ejemplo, los paraguas de micropilotes o de jet grouting, o el precorte mecánico conformando conchas arqueadas de concreto proyectado (Fig. 11).

Y finalmente se puede siempre recurrir al cierre anular del soporte en las inmediaciones del frente, construyendo el arco invertido estructural, sea de pre-soporte o sea definitivo.

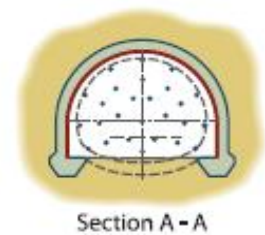
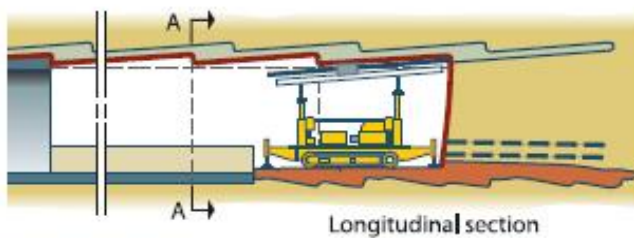
Full face mechanical precutting or pretunnel and reinforcement of the core using fibre glass structural elements



Sub-horizontal jet-grouting around the cavity and in the core



Sub-horizontal jet-grouting around the cavity and reinforcement of the core using fibre glass structural elements



Ground reinforcement using fibre glass structural elements around the cavity and the core

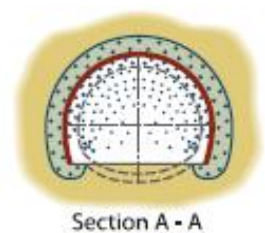
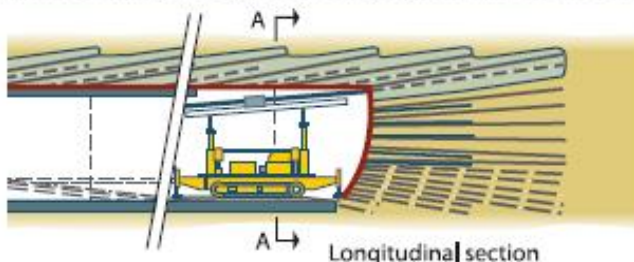


Fig. 11

EL DISEÑO DEL CONTROL DEFORMATORIO

A manera de premisa de este capítulo, es útil complementar la descripción que en la introducción se ha hecho en relación a los posibles tres macro escenarios, o clases de comportamiento de la excavación, en los que por lo general se pueden desarrollar las excavaciones subterráneas:

- *Clase de comportamiento “A”*

Comportamiento a frente estable. 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 mantienen próximos a la resistencia elástica del mismo y los fenómenos de deformación que consiguen a la excavación evolucionan en campo elástico en el frente y eventualmente en un incipiente 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 de comportamiento 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 eventualmente pernos, capaz de contrastar con adecuado margen de seguridad las limitadas cargas radiales del terreno.

- *Clase de comportamiento “B”*

Comportamiento a frente estable solo 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 alcanzan y eventualmente superan por poco las características de resistencia elástica del mismo y los fenómenos de deformación que consiguen a la excavación inician a evolucionar 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 (las extrusiones) inician a 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 tales estructuras están 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 vitrosesina con el objeto de rigidizarlo lo suficiente para permitir un aceptable equilibrio temporal de la cavidad hasta tanto, después de haberse desarrollado una limitada y por lo tanto aún beneficiosa convergencia de la cavidad, entre a actuar el soporte radial instalado.

- *Clase de comportamiento “C”*

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 (las extrusiones) son relevantes y condicionan fuertemente la estabilidad del túnel pudiendo inducir al colapso localizado o generalizado de la cavidad excavada.

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 vitrosesina o metálicos.

Pero en esta clase de comportamiento de la excavación, antes de la instalación del soporte es también necesario actuar a monte del frente de avance con intervenciones mejorativas de protección pre-consolidación y pre-contención del núcleo de avance, 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 vitrosesina.

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 vitrosesina se puede extender en el inmediato estrado del perímetro de la excavación, mediante la colocación de una serie de elementos de vitrosesina 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 limitar también las cargas finales de equilibrio sobre el soporte del túnel.

Debido a las muy precarias condiciones geomecánicas que pueden llegar a mostrar los terrenos en esta problemática clase de comportamiento de la excavación, es posible además que sea necesario complementar e integrar las citadas intervenciones estabilizadoras del núcleo de avance. Para ello se puede por ejemplo recurrir a la construcción de arcos de pre-soporte de la excavación (umbrella arch), o a la ejecución de pre-cortes para conformar conchas arqueadas de concreto proyectado, o a la puesta en obra de arcos de solera estructural al frente, provisionales o definitivos, etc., dependiendo la selección de cada circunstancia específica (Fig. 12).

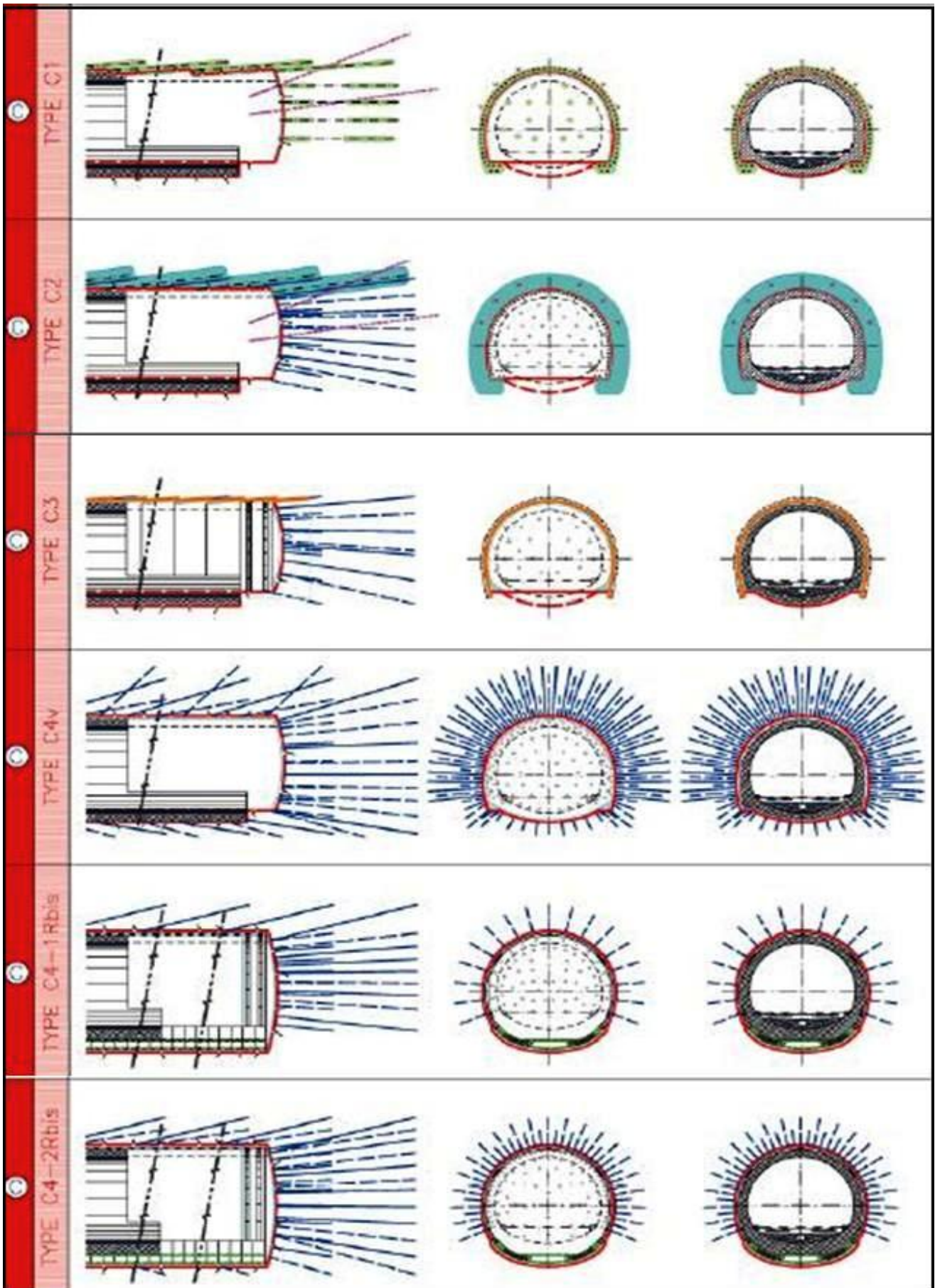


Fig. 12

En cuanto al diseño propiamente dicho debe enfatizarse que el método que se ha descrito para el diseño y la construcción de túneles en condiciones difíciles, basado en el control de la deformación del frente y del núcleo de avance, centra la atención en el análisis de la respuesta deformatoria, entendida como reacción del medio a la acción de excavación, y considera la rigidización del núcleo como una herramienta para el control de la extrusión del frente y de las consecuentes preconvergencia y convergencia de la cavidad.

Tal análisis y tal control desempeñan por lo tanto un papel fundamental y son pasos necesarios para poder diseñar y construir correctamente las obras subterráneas.

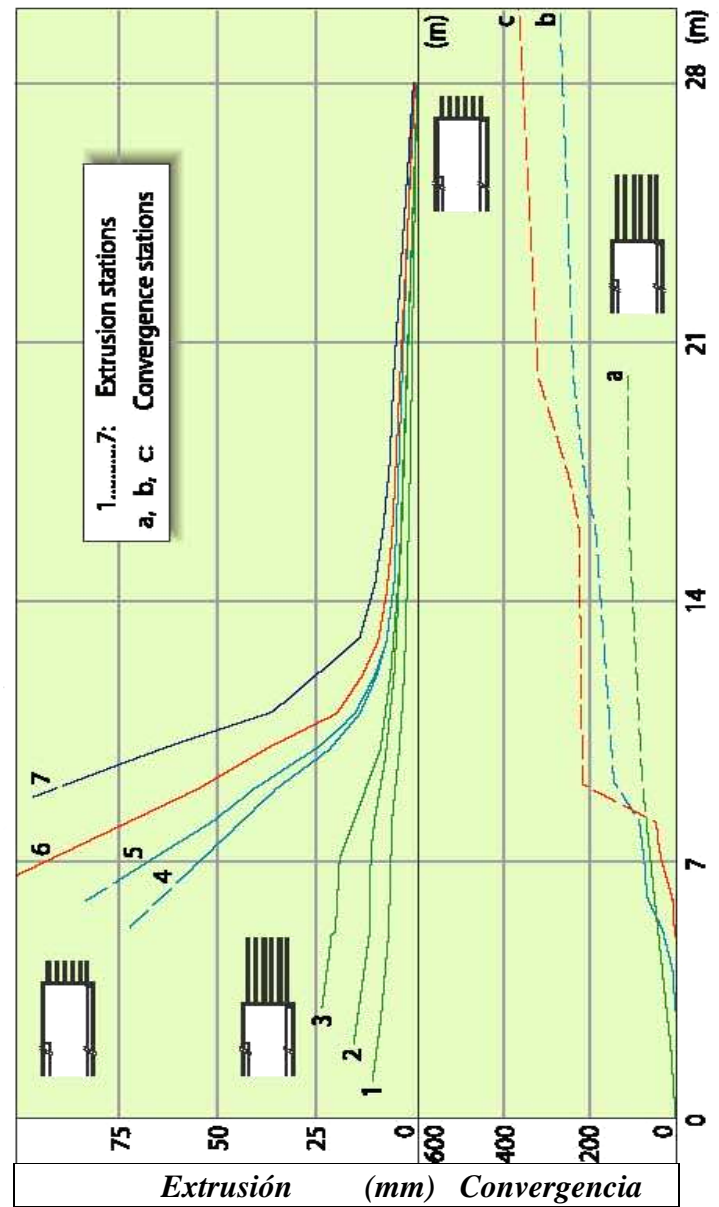
El 'análisis', que se realiza previo a la construcción, cumple con el objetivo de predecir la deformación que se produce como resultado de la excavación, utilizando para ello las herramientas de cálculo analítico o numérico. También incluye, sobre la base de las predicciones hechas, la determinación de los sistemas tiempos y etapas constructivas, así como de los tipos de herramientas y equipos necesarios y útiles para la excavación y para la consolidación protección y estabilización del frente y de la cavidad.

El 'control' en cambio, se produce durante la construcción, cuando se actúan las decisiones diseñadas y las mismas son comprobadas por medio del monitoreo de la respuesta deformatoria a las acciones inducidas con la excavación. Tal control permite las oportunas adecuaciones del diseño a las efectivas condiciones de la obra mediante la implementación de los eventuales ajustes tendientes a optimizar el balance entre las intervenciones

La implementación de la metodología en cuestión implica por lo tanto que el proceso de diseño incluya toda la siguiente secuencia:

- Investigación y caracterización geológica, hidrogeológica y geomecánica del medio natural a excavar.
- Análisis del probable comportamiento de la excavación, suponiendo la ausencia de intervenciones de estabilización, determinando la categoría (A-B-C) de comportamiento de la excavación en función de las condiciones de estabilidad del frente y del núcleo de avance.
- Selección de los posibles procedimientos de excavación y de estabilización, evaluando la eficacia de las soluciones elegidas y previendo los posibles rangos de variabilidad del comportamiento deformatorio real del túnel durante la excavación, incluyendo además la identificación de las correspondientes intervenciones complementarias, alterna o integradoras.

Lo anterior se debe finalmente acoplar perfectamente con la fase de ejecución de la obra, a base de la cual debe absolutamente implementarse un adecuado y riguroso sistema de monitoreo (Fig. 13) y retroalimentación del diseño, conformando así un sistema integrado y de garantía de éxito, no solamente en términos de seguridad y estabilidad, sino también en términos de productividad y de respecto de los costos y sobre todo de los tiempos de ejecución de la obra.



TUNEL VASTO – FERROCARRIL ANCONA-BARI

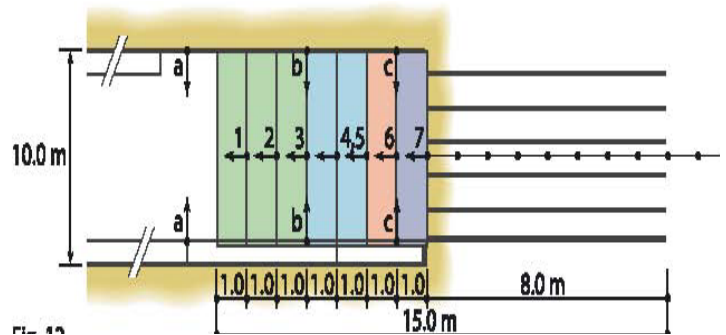


Fig. 13 Monitoreo de la extrusión y de la convergencia en relación con el avance del túnel.

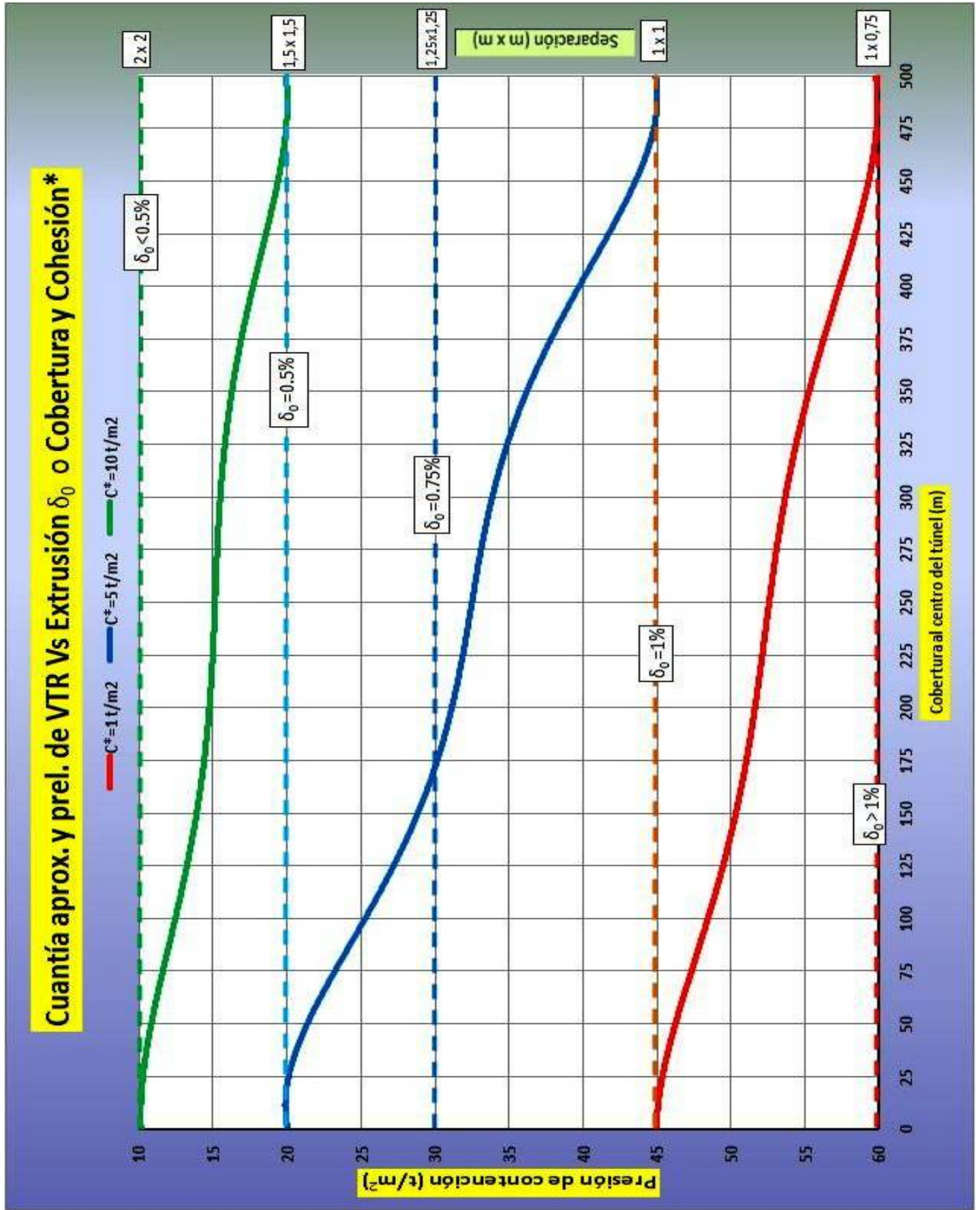


Fig. 14 Abaco para el pre-dimensionado preliminar de las cuantías de VTR (Gianfranco Perri - 2012)

CONCLUSIONES

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 protección) 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 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 en efectos 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 preliminarmente recurriendo a tablas o ábacos (Fig. 14) de referencia y, 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 ajustan 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 optimiza el diseño y la operación del sistema VTR implementado, mediante la adecuada instrumentación y el sistemático monitoreo de las excavaciones.

Para concluir debe también 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 deformatorios de la cavidad en beneficio de la optimización de los soportes temporales y revestimientos definitivos a colocar en un túnel.

REFERENCIAS

Lunardi P. and Others (1993) *Technical and financial planning of underground works: the ADEC O-RS method* VI European Forum of Engineering Economics, Bocconi University, Milano, 13-14 May

Kovári K. (1994) *On the Existence of NATM Erroneous Concepts behind NATM Tunnel* No. 1 - Gallerie e Grandi Opere Sotterranee No. 44

Lunardi P. e Altri (1997) *Una soluzione innovativa per la realizzazione di gallerie naturali senza copertura* Quarry and Construction, May

Perri G. (1998) *Umbrella Arch: En el Ferrocarril Caracas-Cúa un método constructivo para túneles en terrenos difíciles basado en la versión moderna de la técnica del Marchavanti* Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, N° 74. Caracas, Junio

Lunardi P. (2000) *Design & constructing tunnels ADECO-RS a approach* Tunnels & Tunnelling International. Suplemento especial, May

Lunardi P. (2001) *The ADECO-RS approach in the design and construction of the underground works of Rome to Naples High Speed Railway Line: a comparison between final design specifications, construction design and "as built"* AITES-ITA World Tunnel Congress, Milano, 10-13 Junio, Vol. 3

Perri G. (2006) *Clases de com portamiento y cargas de diseño para túneles excavados convencionalmente* VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Cartagena - Colombia, 8-13 Octubre

Lunardi P. (2008) *Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils*. SPRINGER, Berlín Heidelberg. Disponible también en Italiano (Ed. Hoepli) y en Chino (Ed. China Railway and Publishing House)

Perri G. 2012 *Refuerzo del frente de excavación con elementos de vidrio-resinas para avanzar a sección completa en túneles con terrenos débiles* 3° Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterráneas. Sao Paulo Brazil 20 a 22 Marzo

Perri G. (2012) *Tópicos de Ingeniería de Túneles* 500 páginas http://issuu.com/gianfrancoperri/docs/topicos_de_ingenieria_de_tuneles?mode=window&pageNumber=1