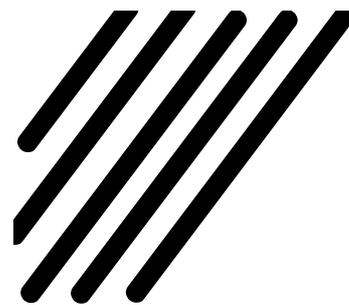


capítulo 4



Pietro LUNARDI
Lunardi Consulting Engineers. Milán

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES CON EL SISTEMA DE ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN CONTROLADA EN ROCAS Y SUELOS

1. INTRODUCCIÓN

Cualquiera que se disponga a realizar una obra subterránea se encuentra enfrentándose y teniendo que resolver un problema de ingeniería civil especialmente complejo, ya que, en comparación con las construcciones de superficie, en las obras subterráneas resulta extremadamente difícil determinar con antelación los datos básicos del diseño.

En primer lugar, no es cuestión, como en las obras de superficie, de ir ensamblando materiales (acero, hormigón armado, etc.), de propiedades resistentes bien conocidas, para construir una estructura que alcanza su equilibrio en la configuración final deseada, sino de actuar sobre un equilibrio preexistente y producir, de algún modo, una *perturbación prevista* en unas condiciones conocidas, sólo de forma aproximada.

Otra característica de las obras subterráneas, bien conocida por los ingenieros de diseño y ejecución, pero a la que no siempre se le da suficiente importancia es que, muy frecuentemente, la fase en la que la estructura se encuentra sometida a mayor tensión no es la final, cuando el túnel está terminado y sujeto a cargas externas previstas en la etapa de diseño, sino durante la fase de construcción, mucho más delicada, ya que, durante esta etapa, los efectos de la perturbación causada por la excavación no están confinados

completamente por el sostenimiento final. En esta etapa, las tensiones preexistentes se desvían debido a la excavación de la cavidad y canalizan alrededor de ella, *efecto arco*, creando zonas de altas tensiones en las paredes de la excavación.

Se comprende lo delicado que es este proceso al considerar que es precisamente la correcta canalización de tensiones alrededor de la cavidad lo que determina la integridad y la vida del túnel. La canalización de tensiones se produce dependiendo de las tensiones en juego y de las propiedades resistentes y de deformación del terreno, Fig. 1.

- 1) cerca de la sección de la excavación
- 2) lejos de la sección de la excavación
- 3) no se produce.

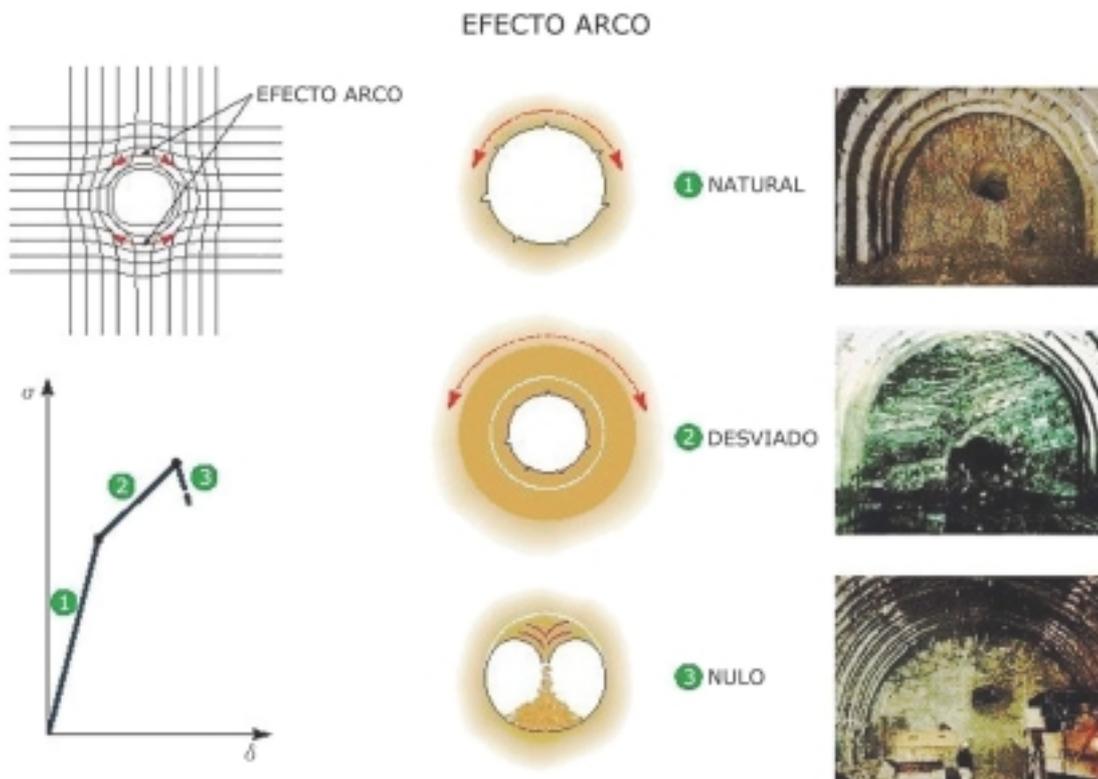


Figura 1. Efecto arco.

El *primer caso* se da cuando el terreno alrededor de la cavidad soporta fácilmente la tensión desviada a su alrededor, respondiendo elásticamente en términos de resistencia y deformación.

El *segundo caso* aparece cuando el terreno alrededor de la cavidad, que no es capaz de soportar el flujo desviado de tensiones, responde inelásticamente, plastificándose y deformándose proporcionalmente al volumen de terreno afectado por el fenómeno de plastificación. El fenómeno de plastificación también produce un incremento del volumen del terreno afectado y se propaga radialmente produciendo la desviación de la canalización de las tensiones lejos del túnel hacia el seno del macizo rocoso hasta que el estado triaxial de tensiones es compatible con las propiedades resistentes del terreno. En esta situación, el *efecto arco* se

produce lejos de las paredes de la excavación, mientras que el terreno alrededor de la excavación que ha sido perturbado hasta este punto es capaz, tan sólo, de contribuir al equilibrio estático final con su propia resistencia residual e incrementando la deformación de forma considerable.

El *tercer caso* aparece cuando el terreno que rodea la excavación es completamente incapaz de soportar el flujo desviado de tensiones y responde en la zona de rotura produciendo el colapso de la cavidad.

Del análisis de estas tres situaciones se puede deducir que:

- S el efecto arco sólo se da de forma natural en el primer caso;
- S en el segundo caso, el efecto arco se produce de una forma natural únicamente si se *ayuda* al terreno con una intervención apropiada que lo estabilice;
- S en el tercer caso, debido a la imposibilidad de generar un efecto arco de forma natural, se debe inducir de forma *artificial* actuando antes de la excavación.

Para un ingeniero la primera y más importante tarea de diseño de un túnel es determinar si es posible y, en su caso, cómo se puede provocar un efecto arco cuando se excava un túnel y, entonces, asegurarse de que se ha formado calibrando la excavación y las operaciones apropiadamente en función de las condiciones particulares de tensión-deformación.

Con este objetivo, resulta imprescindible conocer, Fig. 2.

- S el *medio* en el que van a tener lugar las operaciones;
- S la *acción* ejercida para efectuar la excavación;
- S la *reacción* esperada tras la excavación.



Figura 2. Construcción subterránea.

El *medio* (el terreno), que es realmente el material en el que se lleva a cabo la construcción de los túneles, es un material extremadamente anómalo en comparación con los materiales de construcción habituales en obra civil: es discontinuo, heterogéneo y anisótropo. En la *superficie* presenta características muy variadas que, sin embargo, dependen exclusivamente de su propia naturaleza intrínseca (consistencia natural) que condiciona la morfología de la corteza terrestre. En *profundidad*, por el contrario, sus características cambian en función de los estados de tensiones a los que esté sujeto (consistencia adquirida), que condicionan su respuesta frente a la excavación.

La *acción* se da cuando el frente avanza a través del medio. Es, por lo tanto, un *fenómeno sensiblemente dinámico*: el avance del túnel se puede visualizar como un disco (el frente) que discurre a través del macizo rocoso con una *velocidad* V dejando un espacio vacío por detrás. Se produce una *perturbación en el medio*, tanto en dirección longitudinal como en la transversal, que modifica el estado original de tensiones. El campo original de tensiones, que puede representarse como una red de líneas de flujo, se *desvía* dentro de la zona perturbada debido a la presencia de la excavación (Fig. 1) y se concentra en las inmediaciones produciendo un incremento tensional. El tamaño de estas tensiones aumentadas determina la extensión de la zona perturbada para cada medio (dentro de la cual el terreno sufre una pérdida de propiedades geomecánicas con el correspondiente incremento de volumen) y, por tanto, el comportamiento de la cavidad en relación con la resistencia del macizo rocoso σ_{gd} .

El tamaño de la zona perturbada próxima al frente se define mediante el *radio de influencia del frente* R_f , que identifica el área en la que el ingeniero proyectista debe fijar su atención y dentro de la cual se produce la transición de un estado triaxial de tensiones a un estado de tensiones plano (zona de frente o transición); el estudio adecuado de un túnel requiere métodos tridimensionales y no sólo métodos bidimensionales.

La *reacción* es la respuesta de deformación del medio frente a la acción de la excavación. Se genera por delante del frente, dentro del área perturbada, siguiendo el incremento general de tensiones en el medio alrededor de la cavidad, y depende del medio (consistencia) y de la forma en la que se efectúa el avance del frente (acción). Puede determinar la intrusión de material dentro de la sección teórica de la excavación. La intrusión es sinónimo de inestabilidad de las paredes del túnel.

Pueden darse tres situaciones básicas:

- Si al pasar del estado triaxial de tensiones al estado de tensiones plano durante el avance del túnel, la disminución progresiva de las tensiones en el frente ($\sigma_3 = 0$) ocasiona tensiones en la gama elástica por delante del frente, entonces la pared que queda liberada por la excavación (el frente) permanece *estable* con una *deformación limitada y completamente imperceptible*. En este caso, la canalización de tensiones alrededor de la cavidad *efecto arco* se produce naturalmente cerca de la excavación.
- Si, por el contrario, el descenso progresivo del estado de tensiones en el frente ($\sigma_3 = 0$) produce tensiones en la gama elasto-plástica en el terreno por delante del frente, entonces la reacción es importante y la pared liberada por la excavación se deforma de manera elasto-plástica hacia el interior de la cavidad y da lugar a una situación de *estabilidad a corto plazo*. Esto significa que si no se interviene, se inicia la plastificación que, propagándose radial y longitudinalmente desde los alrededores de la excavación, produce un desplazamiento hacia fuera del efecto arco alejándolo del túnel hacia el interior del macizo rocoso. Este alejamiento del túnel sólo se puede controlar aplicando medidas adecuadas de estabilización.
- Si, finalmente, el descenso progresivo del estado de tensiones en el frente ($\sigma_3 = 0$) provoca tensiones en

la gama de rotura en el terreno por delante del frente, entonces *la respuesta de deformación es inaceptable*, induciéndose el estado de *inestabilidad* por delante del frente, que hace imposible la aparición de un efecto arco: esto sucede en terrenos sueltos o no cohesivos, en los cuales se debe inducir artificialmente el efecto arco ya que éste no puede darse de forma natural.

Se deduce, por tanto, que la formación de un efecto arco y su posición con respecto a la cavidad (de la que sabemos depende la estabilidad del túnel a corto y largo plazo) está determinada por la calidad y la magnitud de la *respuesta de deformación* del medio a la acción de la excavación.

Con estas consideraciones como punto de partida, hace más de veinticinco años comenzamos a estudiar la relación entre los cambios en el estado de tensiones inducidos por el avance del túnel en el medio y la consecuente respuesta de deformación del túnel.

2. INVESTIGACIÓN DE LA RESPUESTA DE DEFORMACIÓN DEL MEDIO

2.1. Introducción

El análisis de la respuesta de deformación del macizo rocoso (*efecto*) ha desarrollado, durante el curso de la investigación, experimentaciones y teorías que comenzaron hace veinticinco años y que aún continúan.

La **primera fase de investigación** estuvo dedicada a realizar estudios sistemáticos de los comportamientos tenso-deformacionales de una gran variedad de túneles durante su construcción. Se prestó especial atención al comportamiento del frente y no únicamente al de la cavidad, como suele hacerse. La complejidad de lo que estábamos estudiando, la respuesta de deformación (*efecto*) se hizo patente muy pronto y tuvimos que identificar nuevos términos de referencia para definirla completamente (Fig. 4):

- S **la zona de avance:** volumen de terreno que se encuentra por delante del frente, de forma virtualmente cilíndrica con, aproximadamente, la altura y el diámetro del túnel;
- S **extrusión:** la componente primaria de la respuesta de deformación del medio a la acción de la excavación, que se desarrolla en gran parte dentro de la zona de avance; la extrusión depende de las propiedades de resistencia y deformación de la zona de avance y de su estado original de tensiones; se manifiesta en la superficie del frente en la dirección del eje longitudinal de túnel y su geometría es, o bien más o menos axialmente simétrica (abombando el frente), o bien como un cono de gravedad (rotación del frente);
- S **preconvergencia** de la cavidad: convergencia de la sección teórica del túnel por delante del frente, fuertemente dependiente de la relación entre las propiedades de resistencia y deformación de la zona de avance y su estado original de tensiones.

Por tanto, durante la **segunda fase de investigación**, se efectuó un análisis detallado -sobre todo en términos de tiempo- de los fenómenos de inestabilidad observados durante la construcción de, al menos, 400 km de túnel en una gama extremadamente extensa de tipos de terreno y condiciones tenso-deformacionales. El objetivo era encontrar la conexión entre el comportamiento del sistema frente-zona de avance (extrusión y preconvergencia) y el de la cavidad (convergencia).

Una vez establecimos que la respuesta de deformación en su totalidad (extrusión, preconvergencia y

convergencia) se encuentra sistemáticamente condicionada por la rigidez del terreno de la zona de avance en el frente (que es, por tanto lo que la ocasiona) trabajamos, en una tercera fase, la **tercera fase de investigación**, para descubrir hasta qué punto se podía controlar la respuesta de deformación de la cavidad (convergencia) actuando sobre la rigidez de esa zona de avance. Para conseguir esto se compararon sistemáticamente el comportamiento de tensión-deformación de la zona de avance con el de la cavidad, tanto efectuando una protección y refuerzo de la zona de avance, como no efectuando intervención alguna.

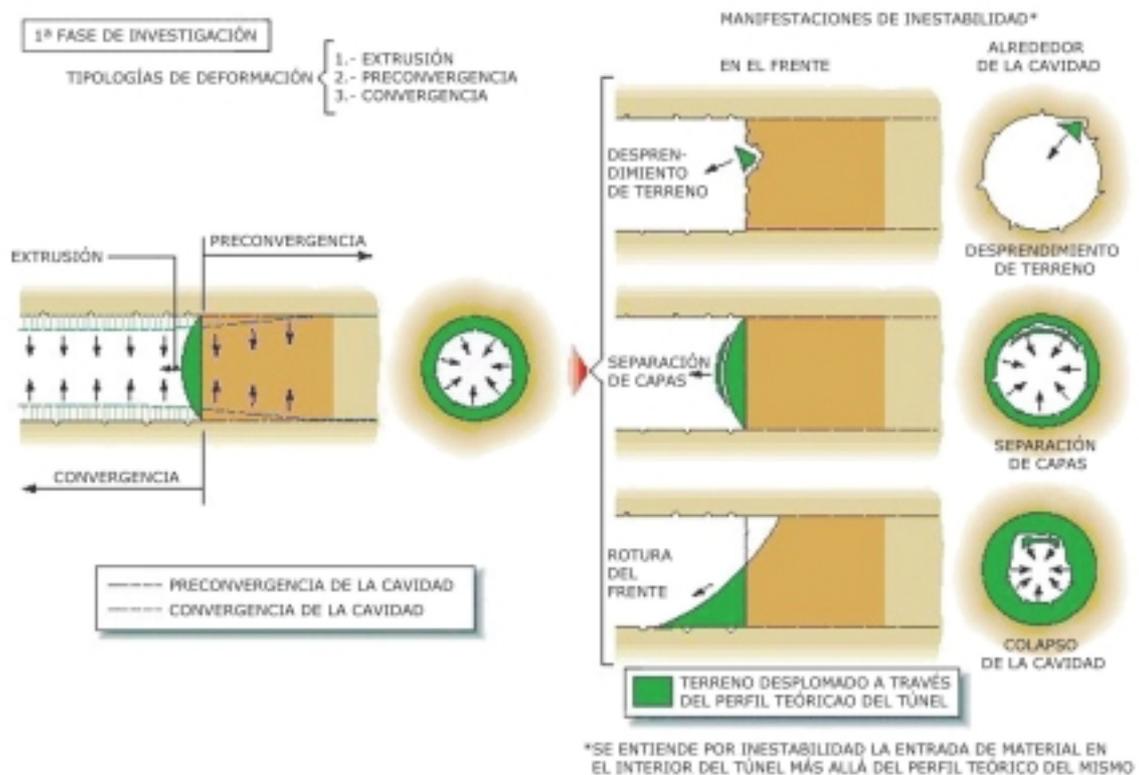


Figura 3. Primera fase de investigación.

2.2. La primera fase de investigación

La primera fase de investigación (observación sistemática del sistema frente-zona de avance) se realizó empleando instrumentos y la observación visual para auscultar los comportamientos de estabilidad de las zonas de avance y de las paredes de los túneles, prestando especial atención a los siguientes fenómenos (Fig. 3):

- la *extrusión del frente*;
- la *preconvergencia de la cavidad*;
- la *convergencia de la cavidad* (disminución del tamaño de la sección transversal teórica de la excavación después del paso del frente).

La observación visual sistemática realizada en el interior de las cavidades permitió asociar las siguientes

manifestaciones de inestabilidad localizadas en el frente o alrededor del mismo (se espera inestabilidad siempre que el material invade una excavación atravesando su sección teórica) con los tipos de deformación mencionados anteriormente:

- a) desplome de terreno, descostramiento y rotura del frente en el sistema frente-zona de avance; posterior extrusión del frente y preconvergencia;
- b) desplome de terreno, descostramiento y colapso en el techo y en las paredes de la cavidad; convergencia de la propia cavidad.

2.3. La segunda fase de la investigación

Una vez se hubieron identificado los tipos de deformación y las manifestaciones de inestabilidad que aparecen *en la zona de avance, en el frente y en el techo y hastiales* de un túnel, nos preguntamos si la observación de las primeras podía, de alguna forma, indicarnos el tipo y la magnitud de las últimas. La segunda fase de investigación comienza entonces (para encontrar las *posibles conexiones* entre la deformación del sistema frente-zona de avance -extrusión y preconvergencia- y la de la cavidad -convergencia-). Se llevó a cabo estudiando, observando y auscultando la deformación en el frente y en la cavidad, prestando especial atención a la magnitud y a la secuencia temporal respecto a los sistemas, fases y avances de la construcción en distintos túneles.

Conviene ilustrar brevemente las observaciones realizadas, con varios ejemplos significativos antes de examinar los resultados de esta fase experimental.

2.3.1. El túnel de la autopista de Frejus (1975)

El noventa y cinco por ciento de la ruta del túnel de la autopista de Frejus (13 km de longitud con recubrimientos de hasta 1700 m) atraviesa una formación metamórfica de limolita cristalina esquistosa, litológicamente homogénea, durante todo el trazado. El diseño del túnel se llevó a cabo a partir de una investigación geológica y geomecánica realizada desde el túnel de ferrocarril adyacente (terminado en 1860) y desde túneles de servicio. Los ensayos de resistencia y deformación efectuados sobre probetas de limolita cristalina esquistosa proporcionaron los siguientes valores geotécnicos medios:

- S ángulo de fricción: 35° ;
- S cohesión: 30 kg/cm^2 ($= 3 \text{ MPa}$);
- S módulo elástico: 100.000 kg/cm^2 ($=10.000 \text{ MPa}$).

No se previó comportamiento de deformación en el diseño original del túnel (1975), ya que entonces no era práctica habitual de diseño.

Se tuvo en cuenta la experiencia de Sommeiller durante la construcción del túnel de ferrocarril adyacente unos cien años antes. Se seleccionó avance a sección completa con estabilización inmediata del anillo de roca alrededor de la cavidad empleando bulones activos de anclaje puntual en el techo, de una longitud de 4,5 m, complementados con hormigón proyectado. El revestimiento final se realizó con hormigón encofrado con un espesor medio de 70 cm aplicado a continuación para terminar el túnel.

Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

El estudio del comportamiento de deformación constituyó la parte más significativa de la campaña de observaciones y medidas realizadas durante la construcción. El objetivo era auscultar la respuesta del macizo rocoso a las medidas de estabilización bajo la circunstancia excepcional de perforar un túnel por primera vez a través de un macizo rocoso homogéneo (limolita cristalina) con recubrimientos variables y sujeto a un campo de tensiones que aumentaba y variaba en función del recubrimiento (0-1700 m).

Hasta un recubrimiento de 500 m, el macizo rocoso permanecía sometido a tensiones dentro de la gama elástica, manifestando el túnel un comportamiento de frente estable, con deformación despreciable, limitándose la inestabilidad a desplomes de terreno en el frente y en la cavidad.

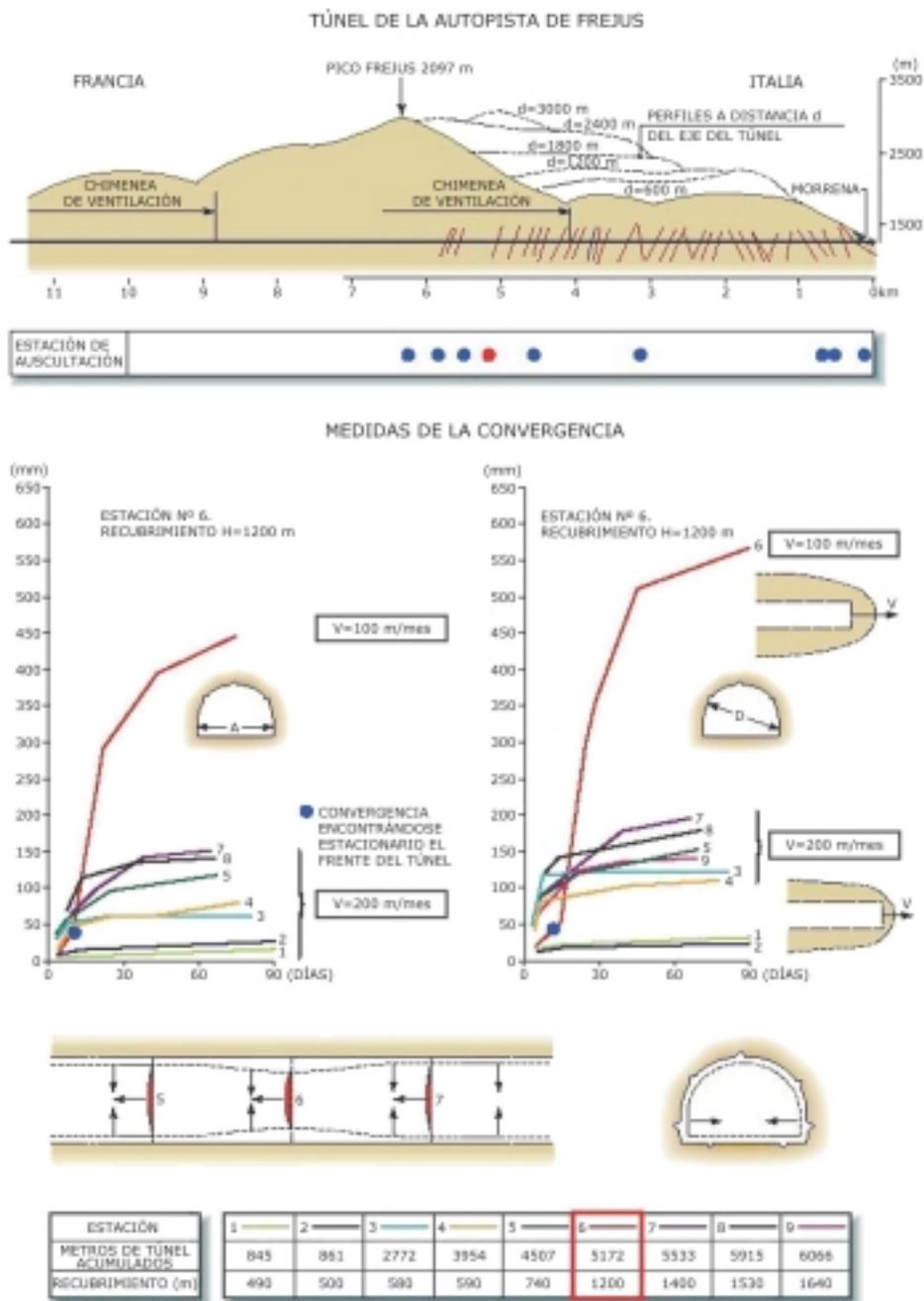


Figura 4. Túnel de la autopista de Frejus.

Según aumentaba el recubrimiento y, en consecuencia, el estado de tensiones, el macizo rocoso entraba en la gama elasto-plástica y el comportamiento del túnel pasaba a ser de frente estable a corto plazo, con una convergencia en la cavidad medible en decímetros (la convergencia diametral era de 10 a 20 cm) la banda de roca reforzada contribuyó eficazmente a la estabilización del túnel, limitando la magnitud de la convergencia e impidiendo posteriores manifestaciones de inestabilidad.

La buena calidad de la roca también contribuyó a mantener ritmos de avance de 200 m/mes hasta que el trabajo se detuvo en el metro 5173 por vacaciones estivales, en una zona de roca homogénea con un recubrimiento de aproximadamente 1200 m.

La estación de medida de la convergencia N° 6, instalada un metro por detrás del frente (metro 5172), mostró una deformación máxima de, aproximadamente, 10 cm a los 10 días de estar detenido el avance (Fig. 4). Se trataba, únicamente y sin duda alguna, de una deformación progresiva (con carga constante), ya que el frente se había detenido completamente durante ese tiempo. Cuando se retomó el avance, aumentó muy bruscamente la convergencia diametral en esa sección hasta valores no registrados hasta ese momento, alcanzando 60 cm después de tres meses, mientras que más adelante volvió a los valores habituales (convergencia diametral de 20 cm) una vez recorridos 20 ó 30 m desde el punto donde se detuvo el avance.

Se debe advertir que, antes de que se detuvieran los trabajos, se había reforzado radialmente el techo del túnel hasta a un metro del frente con más de 30 bulones por metro lineal de túnel, no habiéndose llevado a cabo una mejora del terreno de la zona de avance en el frente.

Una vez detenidos los trabajos, las labores de estabilización alrededor de la cavidad continuaron con la misma intensidad y mismo ritmo que se habían llevado hasta entonces.

La conclusión fue que, mientras que el avance del túnel se encontraba detenido, al no aplicarse ninguna medida de refuerzo a la zona de avance en el frente, ésta había tenido tiempo de extruirse en la gama elasto-plástica, lo que había iniciado el fenómeno de relajación de tensiones, con una deformación progresiva del macizo rocoso alrededor de ella (preconvergencia). Esto, a su vez, provocó un incremento considerable de la convergencia de la cavidad con respecto a los valores normales.

2.3.2. El ejemplo del túnel de "Santo Stefano" (1984)

El túnel de "Santo Stefano" se encuentra en la nueva línea doble de ferrocarril entre Génova y Ventimiglia, situada en el tramo S. Lorenzo - Mare-Ospedaletti.

Discurre a través de una formación tipo *flisch* (depósitos rítmicos, finamente estratificados compuestos por arenas, margas, limos y arcillas) característica de Liguria occidental. Está compuesta de esquistos arenosos y arcillosos con finas capas de areniscas y calizas margosas plegadas e intensamente fracturadas. Los esquistos arcillosos se encuentran fuertemente laminados. Una zona de transición extremadamente tectonizada marca el paso entre la zona H1 y la zona H2, con más caliza margosa.

Los ensayos de resistencia efectuados en laboratorio sobre muestras proporcionaron valores del ángulo de fricción entre 20° y 24° y cohesiones de 0 a 15 kg/cm² (1,5 MPa).

Igualmente, en este caso en el que el trabajo dio comienzo en 1982, no se realizaron previsiones acerca del

comportamiento de deformación del túnel. El diseño original implicaba un avance a sección completa con cerchas de acero y hormigón proyectado para el sostenimiento primario y hormigón encofrado (hasta 110 cm) para el sostenimiento final.

Durante la excavación se observó que, mientras el terreno permanecía elástico, la deformación en el frente y en el túnel era despreciable y no había en la práctica manifestaciones de inestabilidad localizada (comportamiento de frente estable). Cuando el túnel entraba en una zona afectada por estados de tensión residuales de origen tectónico en la que el estado de tensiones estaba dentro de la gama elasto-plástica, los fenómenos de deformación empezaban a causar algunas dificultades, también debido a la aparición de empujes asimétricos apreciables provocados por masas dispersas en la matriz plástica. A medida que esto sucedía, se observaron estratos de material que se rompían en el frente, signo inequívoco de la presencia de movimiento de extrusión, característico de la situación de frente estable a corto plazo; la convergencia alcanzó valores decimétricos.

En un cierto momento, el estado de tensiones del macizo rocoso obviamente se había desarrollado dentro de la gama de rotura habiéndose producido la rotura total del frente (situación de frente inestable), a la que, en las siguientes horas, seguía el colapso de la cavidad, con convergencias diametrales de más de 2 m, hasta 30 m de túnel por detrás del frente, incluso en la zona en la que ya se habían colocado cerchas y aplicado hormigón proyectado, Foto 1.



Foto 1. Túnel de Stefano (Italia, línea de ferrocarril Génova-Ventimiglia; terreno: calizo-margoso tectonizado y laminado, recubrimiento: 150 m, diámetro de túnel: 12 m). Colapso de la cavidad.

Se debe advertir en este punto que el tipo de terreno encontrado en las tres situaciones de tensión-deformación mencionadas fue esencialmente el mismo y que el fenómeno de colapso del túnel, con convergencias medibles en metros, incluso en la parte del túnel en la que ya se había instalado el sostenimiento primario, únicamente se produjo cuando la zona de avance en el frente ya no era rígida ni, por tanto, capaz de contribuir al equilibrio del túnel.

2.3.3. El ejemplo del túnel de "Tasso" (1988)

El túnel de "Tasso" forma parte de una serie de túneles excavados hacia finales de los ochenta para la nueva línea de ferrocarril de alta velocidad Roma-Florenia. La zona en la que está situado el túnel se encuentra en el sinclinal lacustre del Valdarno Superior y está compuesta por arenas limosas y limos arcillosos con niveles intercalados de arcillas limosas que presentan lentejones arenosos y niveles saturados de agua.

El diseño original suponía avance a media sección y estabilización de los hastiales con cerchas y hormigón proyectado. Las cerchas se anclaban al suelo mediante barras sub-horizontales de atado y se cimentaban con micropilotes o columnas de terreno mejorado mediante *jet-grouting*.

La excavación avanzó inicialmente con un frente estable a corto plazo sin fenómenos apreciables de deformación ni en el frente, ni en el túnel.

Según fue aumentando el recubrimiento y, por tanto, el estado de tensiones del medio y, también dadas las características pobres del terreno, las condiciones de frente estable cambiaron rápidamente a las de *frente inestable*. Después de la rotura del frente, a pesar del avance a media sección, colapsaron aproximadamente 30 ó 40 m de túnel excavado y protegido con cerchas durante el curso de una sola noche, con una convergencia del orden de 3 ó 4 m, Fig. 26.

2.3.4. Resultados de la segunda fase de la investigación

El estudio y análisis de los casos mencionados y otros similares que sería demasiado largo describir aquí, sugieren ideas de gran interés. Del caso de Frejus se pueden hacer claramente los siguientes comentarios:

- cuando se avanza a través de terreno en condiciones elasto-plásticas, es muy importante mantener constantes y sostenidos los ciclos de excavación de cara a evitar que la zona de avance tenga tiempo de deformarse: es, de esta forma, posible evitar el inicio de los fenómenos de extrusión y de convergencia que son el punto de partida de la posterior convergencia de la cavidad.

Por otra parte, se deduce de las otras experiencias y casos citados que:

- los fallos de la zona de avance y de la cavidad nunca suceden sin que uno venga seguido del otro y, en particular, sin que el último venga precedido del primero.

De la segunda fase de investigación se extrajeron las siguientes conclusiones (Fig. 5):

- 1) existe una íntima conexión entre la extrusión de la zona de avance en el frente y los fenómenos de preconvergencia y convergencia de la cavidad;
- 2) existen íntimas conexiones entre los fallos de la zona de avance y el colapso de la cavidad, incluso si el último se ha estabilizado;
- 3) los fenómenos de deformación en la cavidad son siempre cronológicamente consecuentes y dependientes de los que afectan a la zona de avance en el frente.

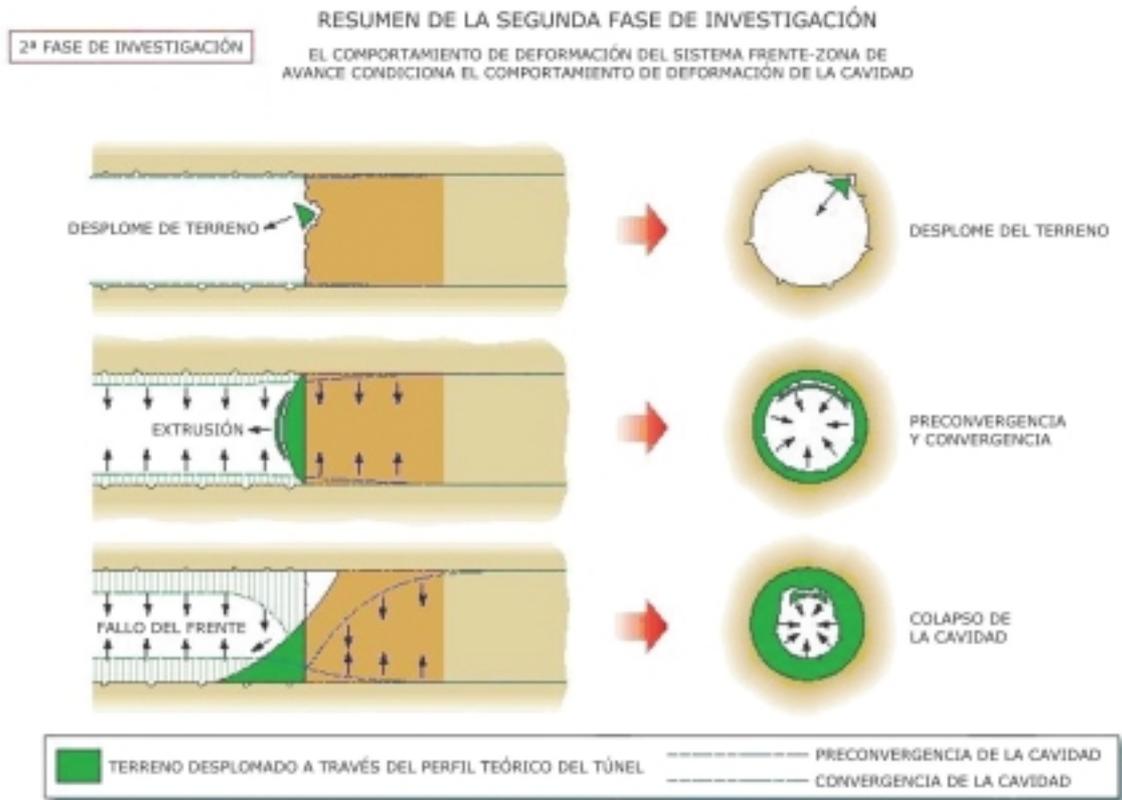


Figura 5. Síntesis de la segunda fase de investigación.

Se advirtió, asimismo, que era necesario para la formación del efecto arco (que, como sabemos, condiciona la estabilidad del túnel), que se hubiera iniciado ya por delante del frente para seguir actuando en una determinada sección, una vez el frente la hubiera atravesado.

2.4. Tercera fase de investigación

Los resultados de la segunda fase de investigación reforzaron la impresión, que ya teníamos previamente, de que la deformación de la zona de avance de un túnel era la verdadera causa de todos los procesos de deformación en todas sus vertientes (extrusión, preconvergencia y convergencia) y que, en consecuencia, la rigidez de la zona de avance jugaba un papel determinante en la estabilidad de un túnel, tanto a largo, como a corto plazo.

Si se toma un punto A situado en la zona de avance de un túnel aún por excavar, de hecho es bastante evidente que su movimiento radial u (preconvergencia) según se aproxima el frente, depende de las propiedades de resistencia y deformación del terreno en el interior de la zona que ocupará el futuro túnel.

Si se representa la trayectoria de su movimiento radial en un gráfico $p-u$ (donde p es la presión de confinamiento ejercida radialmente sobre A), se puede observar (Fig. 6) que, mientras que el frente permanece alejado (distancia de A mayor que el radio de influencia del frente R_f), el estado de tensiones de A permanece invariable (presión de confinamiento radial $p_0 =$ presión original). Según se va acercando el

frente, sin embargo, la presión de confinamiento radial p también se reduce. A se empieza entonces a desplazar radialmente hacia el interior de la futura cavidad. La magnitud de este desplazamiento depende, como ya se ha dicho y resulta bastante evidente, de las tensiones presentes y de las propiedades de deformación de la zona de avance que determina su equilibrio y no, únicamente, de las características geomecánicas del terreno circundante.

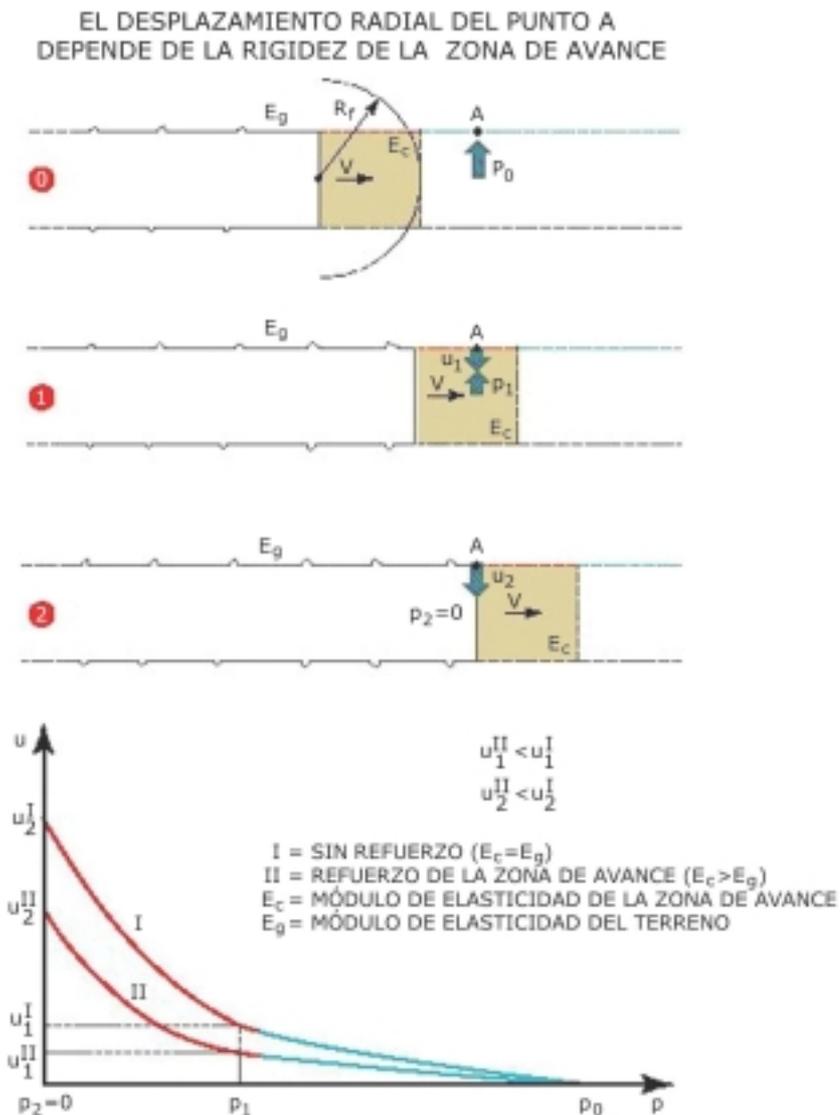


Figura 6. El desplazamiento radial del punto A depende de la rigidez del frente de avance.

Por otro lado, después del paso del frente, continúa el movimiento radial de A, en la gama elástica o elasto-plástica, en función de los estados de tensiones preexistentes, de las características del terreno que queda detrás del sostenimiento y de la presión de confinamiento radial ejercida por los trabajos de estabilización (sostenimiento primario y secundario) de los que depende el equilibrio del punto A.

El gráfico cualitativo de la Fig. 6 muestra otras condiciones que permanecen invariables, la trayectoria de la

deformación a la que se encuentra sujeta *A* en el caso de una zona de avance deformable (curva I) y en el caso de una zona de avance rígida (curva II): obviamente, hasta el paso del frente, según la presión de confinamiento radial p disminuye, la deformación radial del punto *A* es menor para una zona de avance rígida, que para una zona de avance deformable. Incluso parecería probable que, tras el paso del frente y, por lo tanto, sin el confinamiento ejercido por la zona de avance, las curvas I y II permanecieran claramente separadas y que el movimiento del punto *A* estuviera determinado por su historia previa de tensión-deformación. Se deduce que las propiedades de deformación de la zona de avance constituyen un factor capaz de condicionar la respuesta de deformación del terreno frente a la excavación y debe considerarse la verdadera causa de ella.

Ahora bien, si las propiedades de deformación de la zona de avance constituyen la verdadera causa de la respuesta de deformación del terreno frente a la excavación, parece lógico plantear la hipótesis haciendo uso de la zona de avance como una *nueva herramienta para controlar esa respuesta*, actuando sobre su rigidez mediante la intervención apropiada.

Por tanto, trabajamos en la posibilidad de regular la rigidez de la zona de avance para averiguar hasta qué punto esto permitiría controlar la respuesta de deformación de la cavidad.

Para hacer esto se tenían que investigar y desarrollar nuevas tecnologías y tipos de intervención que pudieran actuar sobre la zona de avance protegiéndola de tensiones excesivas (técnicas protectoras) y/o conservando o mejorando sus propiedades de resistencia y deformación (técnicas de refuerzo). Estos tipos específicos de intervención se denominan *técnicas de conservación* o *técnicas de preconfinamiento de la cavidad* para distinguirlas del confinamiento habitual que actúa únicamente en el terreno que rodea la cavidad tras el paso del frente (Fig. 7)[1].

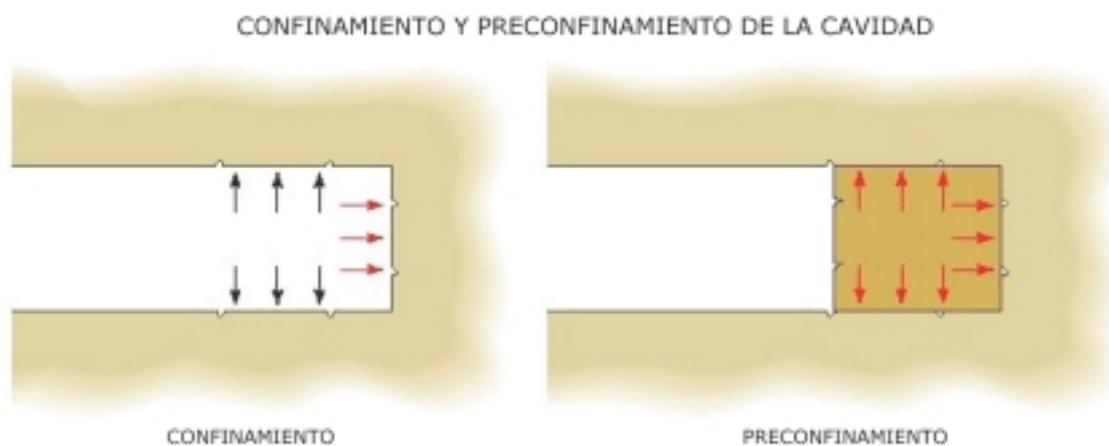


Figura 7. Acciones de confinamiento y preconfinamiento de la cavidad.

Estas nuevas ideas se probaron entonces en la construcción de una serie de túneles bajo condiciones muy difíciles de tensión-deformación. Se describe a continuación uno de estos experimentos en un túnel especialmente difícil y, por tanto, muy significativo.

2.4.1. El túnel de "Vasto"

El trazado del túnel parte de la nueva línea de ferrocarril Ancona-Bari, discurre a lo largo de aproximadamente 6200 m bajo las colinas en las que se encuentra situado el pueblo de Vasto.

Desde un punto de vista geológico (Fig. 8), la parte baja-intermedia de este relieve accidentado está compuesta por terrenos complejos, principalmente de constitución arcillosa y limosa, de color gris, estratificados con pequeños niveles arenosos intercalados, mientras que la parte más alta está formada por un banco de conglomerados cementados en mayor o menor medida, sobre los que se extiende una lámina de terreno arenoso-arcilloso de color marrón amarillento.

El túnel discurre completamente a través de la formación arcillosa de base con la excepción de los tramos próximos a los emboquilles. A la profundidad del túnel, el terreno se encuentra saturado de agua y es extremadamente sensible a la dislocación.

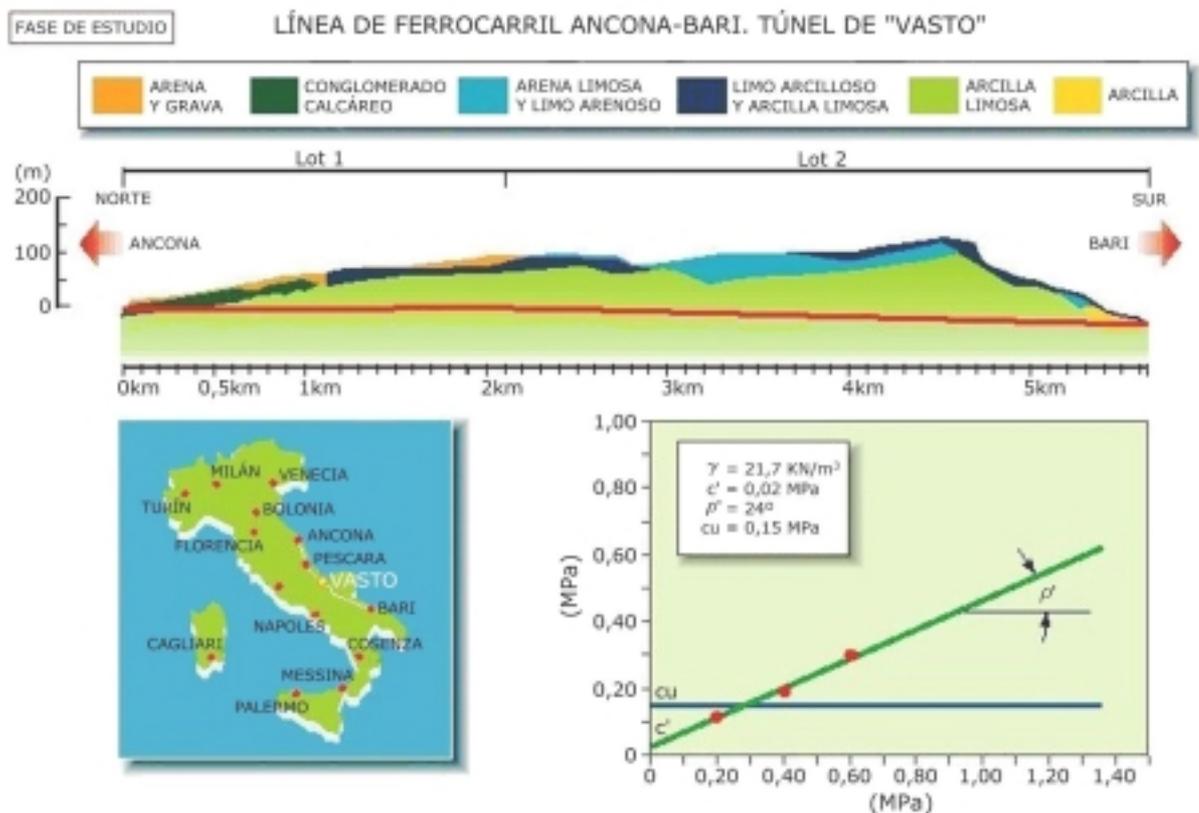


Figura 8. Túnel de vasto.

2.4.1.1. Breve historia de la excavación

Los trabajos dieron comienzo en 1984 en el emboquille Norte y continuaron lentamente entre graves y repetidos incidentes hasta abril de 1990.

El diseño original suponía la excavación a media sección y su inmediata protección mediante un sostenimiento temporal de hormigón proyectado, cerchas de acero y mallazo de acero soldado. El

revestimiento final, de un metro de espesor de hormigón armado se encofraba justo por detrás del frente. Las paredes laterales del túnel se encofraban a continuación como recalce, encofrándose la contrabóveda para completar el trabajo.

Después del primer incidente serio de deformación del túnel, se hizo un intento de recuperar el avance del túnel empleando varios métodos, cada uno de los cuales resultó completamente inadecuado. Finalmente, hubo un desplome desastroso en el kilómetro 38+075 bajo un recubrimiento de 38 m que afectó al frente (Foto 2) y a un tramo de, aproximadamente, 40 m por detrás de éste. Produjo una deformación de enormes dimensiones (más de un metro) en el revestimiento final y resultó imposible seguir trabajando.



Foto 2. Túnel de Vasto (Italia, línea de ferrocarril Ancona-Bari; terreno: arcilla limosa, recubrimiento: 135 m, diámetro del túnel: 12,20 m). La extrusión del terreno a través del frente durante el avance y la destroza (según los principios del NATM).

En este punto se me llamó para encontrar una solución que permitiera la recuperación de los trabajos detenidos y completar el túnel. Atajé el problema empleando un nuevo método de avance para el resto del túnel, basado en los principios de control de la deformación reforzando el frente y la zona de avance, empleando, a continuación, técnicas de preconfiamiento.

2.4.1.2. La fase de estudio del túnel de "Vasto"

Antes de iniciar un nuevo diseño, pareció sensato adquirir un conocimiento geotécnico más avanzado del material a excavar.

El terreno, que formaba parte de la zona inferior de la formación de arcilla, se clasificó como limos arcillosos o arcillas limosas medianamente plásticas a altamente plásticas e impermeables, marcadamente susceptibles al hinchamiento en contacto con el agua.

Aunque los ensayos de corte directo en célula triaxial proporcionaron una gama bastante amplia de valores

de cohesión y de ángulos de fricción, proporcionaron valores medios de resistencia muy bajos.

Se emplearon entonces algunos “ensayos de extrusión en célula triaxial” para modelizar el avance del túnel en el laboratorio bajo las condiciones reales de tensión del túnel *in situ*. Estos ensayos, integrados mediante modelos de elementos finitos simples, hicieron posible calibrar los parámetros geomecánicos (c , Φ , E) para emplearlos en las fases posteriores de diagnóstico y tratamiento. La simulación directa de los ensayos disponibles de extrusión en célula triaxial (integrados con ensayos consolidados y no consolidados de corte en célula triaxial) se empleó para determinar las siguientes gamas de variación de los principales parámetros geomecánicos:

$$c_u = \text{cohesión sin secar} = 0,15 - 0,4 \text{ MPa} (= 1,5 - 4 \text{ kg/cm}^2)$$

$$c' = \text{cohesión seca} = 0 - 0,2 \text{ MPa} (= 0 - 2 \text{ kg/cm}^2)$$

$$\varphi_u = \text{ángulo de fricción sin secar} = 0^\circ - 10^\circ$$

$$\varphi' = \text{ángulo de fricción seco} = 18^\circ - 24^\circ$$

$$E = \text{módulo de Young} = 500 - 5.000 \text{ MPa} (= 5.000 - 50.000 \text{ kg/cm}^2).$$

2.4.1.3. Fase de diagnóstico en el túnel de “Vasto”

Las entradas para esta fase fueron los conocimientos geológico, geotécnico, geomecánico e hidrogeológico obtenidos de la aplicación de métodos teóricos y empíricos a los datos obtenidos de los estudios *in situ* y de los ensayos de laboratorio realizados con el suelo en cuestión. Se empleó para efectuar previsiones del comportamiento tenso-deformacional del frente y de la cavidad en ausencia de intervención para estabilizar el túnel. El propósito era dividir el túnel en secciones, cada una con un comportamiento de deformación uniforme en términos de las tres condiciones básicas de tensión-deformación que se pudieran dar.

Entonces el estudio de diagnóstico continuó con el análisis de los mecanismos de cizalla y de la cinemática de la inestabilidad que se produciría como consecuencia del desarrollo de los fenómenos de deformación y concluyó con una estimación de la extensión de las zonas inestables y de la magnitud de las cargas movilizadas que, sin embargo, no forman parte del alcance de este capítulo.

2.4.1.4. Previsión del comportamiento de tensión-deformación

Las previsiones del comportamiento tenso-deformacional a lo largo del trazado se efectuaron empleando dos procedimientos distintos (Fig. 28), ambos válidos para estados de tensión bajos, medios y altos: el primero, más inmediato, se basa en la teoría de la línea o curva característica (calculada mediante métodos numéricos o analíticos, dependiendo de la situación), el otro, algo más largo, se basa en los ensayos de extrusión en célula triaxial, mencionados en el párrafo que habla de la fase de estudio.

En el caso del túnel de “Vasto”, excepto para los pequeños tramos próximos a los emboquilles, ambos procedimientos predijeron comportamientos inestables del frente con una importante extrusión y, en consecuencia, también preconvergencia y convergencia (por encima de 100 cm radiales). Estos valores son

suficientes para producir serias manifestaciones de inestabilidad, como la rotura del frente y, por tanto, el colapso de la cavidad.

2.4.1.5. Fase de tratamiento en el túnel de “Vasto”

Las predicciones efectuadas durante la fase de diagnóstico de emplearon como punto de partida para decidir, tanto el tipo de acción a tomar (preconfinamiento o simple confinamiento), como la intervención requerida, en el contexto de la categoría de comportamiento prevista, para conseguir la completa estabilización del túnel.

Primero se consideraron las características del terreno a excavar (incluyendo el emboquille Sur que debía abrirse en condiciones de terreno deslizante) y los resultados de la fase de diagnóstico que previó un comportamiento inestable en toda la longitud del trazado subterráneo (tensión en la gama de rotura, efecto arco inexistente, manifestaciones típicas de inestabilidad: rotura del frente, colapso de la cavidad). Se decidió entonces estabilizar el túnel ejerciendo una acción de preconfinamiento, interviniendo decididamente por delante del frente para garantizar la formación de un efecto arco artificial, también, por delante del frente.

En concreto, se decidió avanzar a sección completa después de adoptar técnicas de conservación mixtas para crear un efecto de preconfinamiento, actuando tanto en la zona de avance (acción protectora), como directamente (acción de refuerzo).

Se diseñaron tres secciones tipo alternativas (Fig. 9) en función de la homogeneidad y consistencia del terreno encontrado durante el avance.

La única diferencia entre los tres secciones fue el tipo de tratamiento (preconfinamiento o pre-refuerzo) a adoptar por delante del frente alrededor de la futura cavidad, mientras que el método empleado para el refuerzo del terreno de la zona de avance fue el mismo para los tres.

La elección de la técnica a emplear alrededor de la zona de avance dependió estrictamente de la naturaleza y de la consistencia adquiridas por el terreno a excavar.

En terreno granular o donde el terreno era débil y se caracterizaba por una baja resistencia al corte, se especificó el empleo del *jet-grouting*.

Es de sobra conocido que la tecnología más apropiada para crear escudos resistentes por delante del frente en terrenos cohesivos, compactos y homogéneos y que es capaz de garantizar la movilización de un *efecto arco* es el precorte mecánico.

En terrenos en los que los valores sin secar de la resistencia al corte y de la cohesión hacen desaconsejable el uso de esta técnica, se puede conseguir una capa de terreno mejorado por delante del frente alrededor de la de la zona de avance y de la cavidad, empleando inyecciones con fracturación hidráulica a través de tubos de fibra de vidrio especialmente preparados.

Los tres tipos de sección del túnel se completaron con un confinamiento a partir del frente, consistente en cerchas de acero y hormigón proyectado, cerrado con la contrabóveda y, posteriormente, con la aplicación del revestimiento final de hormigón.

Una vez seleccionada la sección tipo, se efectuaba el refuerzo de la zona de avance mediante tubos de fibra de vidrio. Este trabajo constaba de la elección del *número* de tubos a insertar, su *longitud* y la *geometría* de su configuración en el frente.

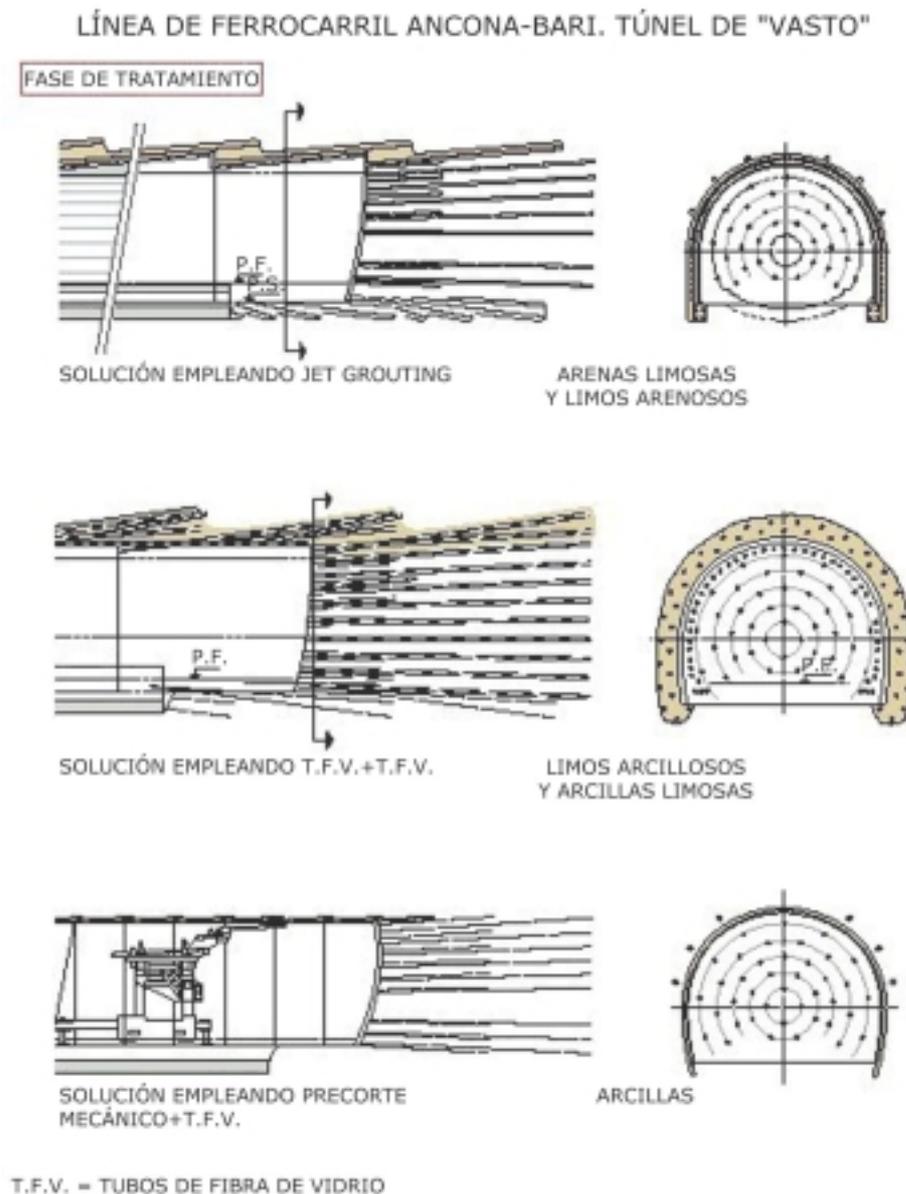


Figura 9. Túnel de Vasto.

Al igual que con el sistema adoptado durante la fase de diagnóstico para predecir el comportamiento de la cavidad, se emplearon dos procedimientos diferentes para decidir el número de tubos de fibra de vidrio (Fig. 10).

El primer procedimiento se basó en el método de la línea característica, teniendo en cuenta, de forma simplificada, el efecto del refuerzo de la zona de avance en el cálculo de la correspondiente línea curva característica.

El segundo procedimiento para el diseño del refuerzo del terreno de la zona de avance se basó en la interpretación de las curvas de extrusión obtenidas a partir de los ensayos triaxiales de extrusión. Habiendo identificado inicialmente la curva de presión mínima de confinamiento P_i necesaria para estabilizar el frente (definida como la presión límite entre las ramas elástica y elasto-plástica de la curva de extrusión), se emplearon diagramas experimentales, del tipo que se muestra en la misma figura, para calcular el número de tubos necesarios para garantizar la seguridad del frente con el factor de seguridad deseado.

Ambos planteamientos (ensayos de extrusión y líneas características) proporcionaron resultados comparables, lo que confirmó la analogía conceptual que comparten.

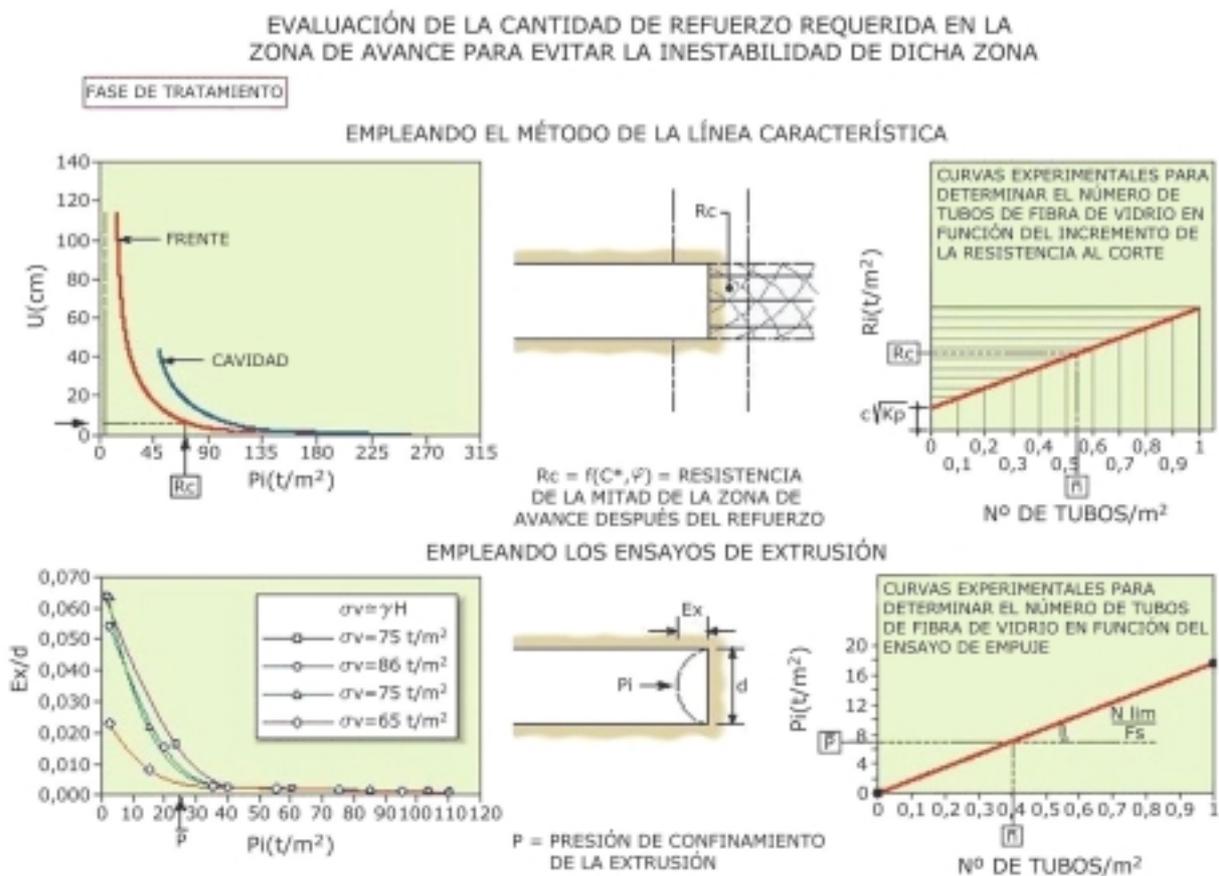


Figura 10. Evaluación del refuerzo del frente necesario para prevenir su inestabilidad.

2.4.1.6. Fase de operación en el túnel de "Vasto"

En 1992 se retomó el trabajo casi simultáneamente en ambos emboquilles, en el Norte para reparar el tramo de túnel colapsado y en el emboquille Sur para empezar el avance. Los ritmos de avance medios, trabajando siete días a la semana fueron de, aproximadamente, 50 m de túnel acabado por mes (Foto 3).

La Fig. 11 compara los gráficos de avances medios mensuales con los de la convergencia medida para el mismo período. La marcada tendencia de los últimos en seguir a los primeros en proporción inversa es particularmente significativa y confirma el hecho de que cuanto menos tiempo tiene el frente para deformarse,

menores extrusión y preconvergencia se inician (la convergencia, al depender de éstas últimas, también queda limitada).



Foto 3. El túnel de Vasto: refuerzo de la zona de avance con tubos de fibra de vidrio durante la excavación a sección completa (de acuerdo con los principios A.DE.CO.-RS).

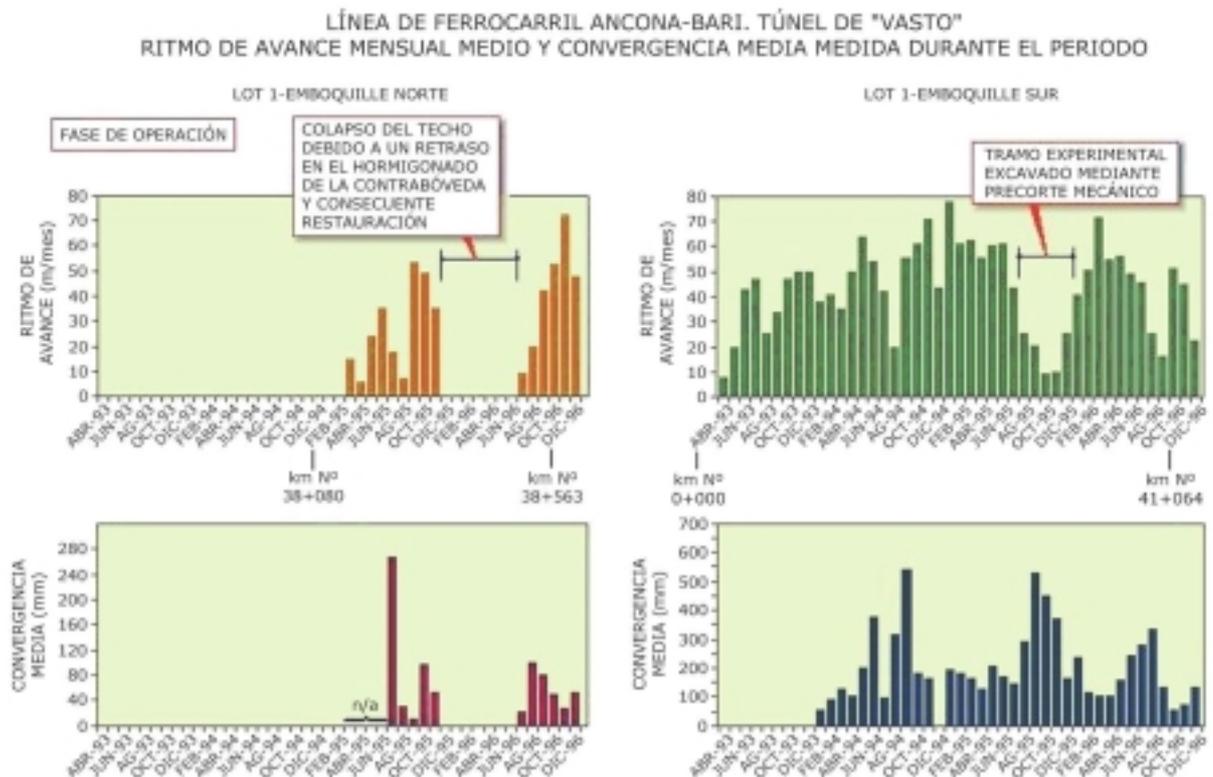


Figura 11. Fase de operación del Túnel de Vasto.

2.4.1.7. Fase de monitorización durante la construcción del túnel de "Vasto"

La fase de monitorización o auscultación comenzó al mismo tiempo que la excavación y supuso la interpretación de la respuesta de deformación del medio a la excavación con el objetivo de optimizar y calibrar las diferentes técnicas para estabilizar el túnel.

Además de la medición normal de la convergencia y de la presión, se tomaron sistemáticas y simultáneas medidas de la extrusión y de la convergencia en el túnel de "Vasto". Éstas constituyeron una novedad de particular interés, en especial considerando los resultados que han podido ofrecer hasta la fecha.

Los resultados de estas mediciones se resumen en los gráficos de la Fig. 12, que muestra la evolución simultánea de la extrusión y de la convergencia para un ciclo completo de trabajo.

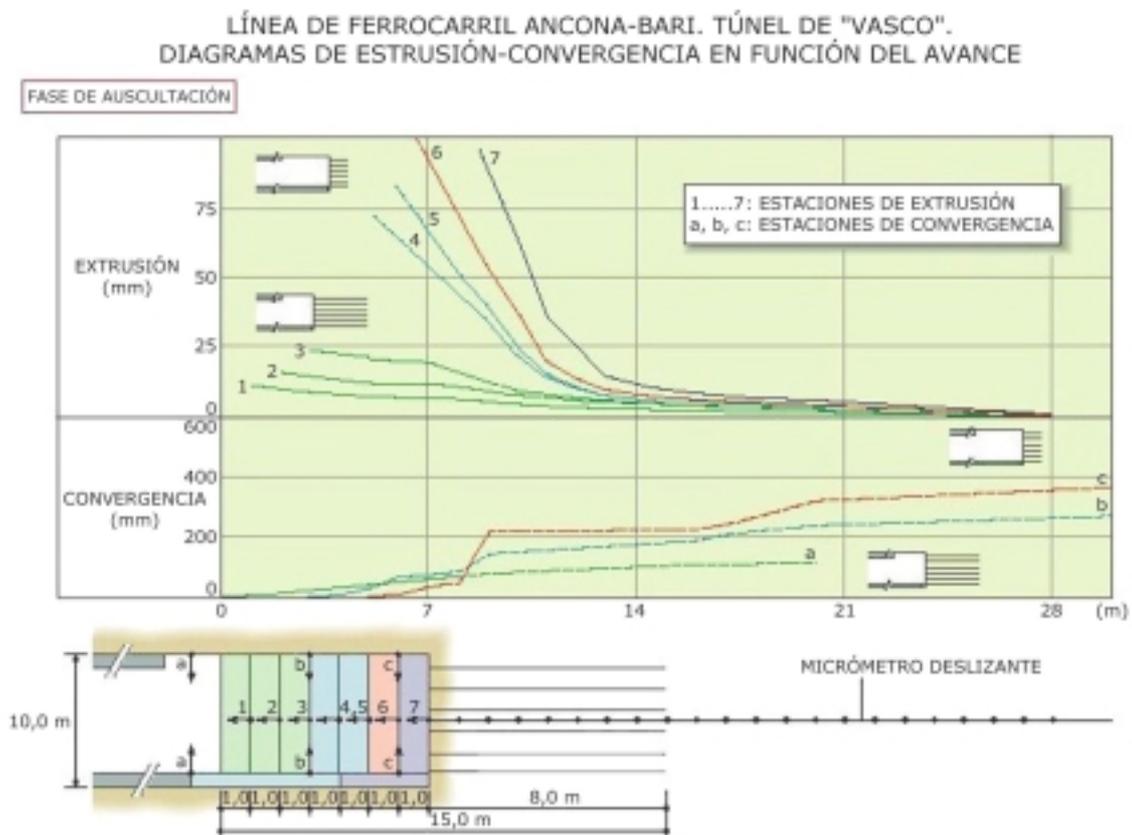


Figura 12. Fase de monitorización del Túnel de Vasto.

El examen de los gráficos muestra que, según avanza el frente y según la parte reforzada de la zona de avance se reduce de los 15 m iniciales a, únicamente, 5 m, (con la consecuente reducción en su rigidez media) se desarrolla una respuesta de deformación del propio frente (extrusión) y de la cavidad a partir del frente (convergencia) que gradualmente se mueve de la gama elástica a la gama elasto-plástica. En particular, las curvas de convergencia empiezan con una tendencia inicial típica de una situación que se decanta

rápido hacia la estabilidad (valores máximos del orden de 10 cm que se producen siguiendo los valores máximos de extrusión de menos de 2,5 cm) y cambian gradualmente su curso tendiendo a una probabilidad creciente de aparición de una deformación que no se pueda detener. Por ejemplo, cuando la longitud de la zona de avance reforzada cae por debajo de 5 m, se desarrolla una extrusión del orden de 10 cm que da lugar a una convergencia cuatro veces mayor que la medida al principio del ciclo de trabajo.

En este contexto, por tanto, la lectura combinada de la extrusión y de la convergencia de la cavidad es un indicador extremadamente importante para el ingeniero proyectista de cara a poder establecer el momento en el que se debe detener el avance e iniciar un nuevo ciclo de refuerzo y recuperar la longitud mínima de zona de avance reforzada necesaria para mantener el terreno, si no en la gama elástica, al menos fuera de la gama de rotura.

2.4.2. Resultados de la tercera fase de investigación

El estudio y la experimentación realizada en el túnel de Vasto mostró claramente tanto la existencia de una íntima conexión entre la deformación que se da en la zona de avance de un túnel (extrusión) y la que se desarrolla posteriormente alrededor de la cavidad después del paso del frente (convergencia) y también (Fig.13, resultados de la tercera fase de la investigación), que la deformación de la cavidad puede controlarse y reducirse considerablemente regulando artificialmente las propiedades de deformación y, por tanto, la rigidez de la zona de avance (confinamiento de la extrusión). Esto es posible gracias al empleo de técnicas de estabilización apropiadas, dimensionadas cuidadosamente y equilibradas entre la zona de avance en el frente y la cavidad, en función de las propiedades resistentes y de deformación del medio en relación con las eventuales condiciones de tensión.

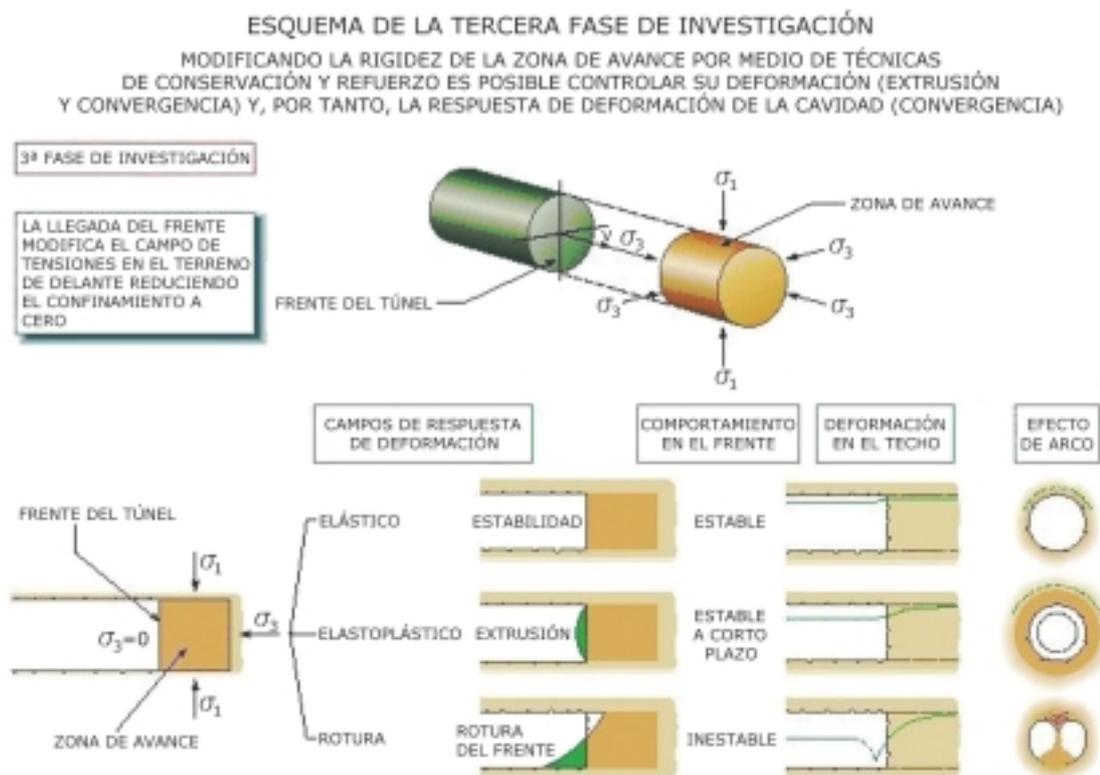


Figura 13. Tercera fase de investigación.

A este respecto, si un medio se somete a tensión en la gama elasto-plástica:

- si el estado de tensiones es reducido con respecto a las características del medio, entonces podría ser suficiente actuar en la cavidad empleando, únicamente, medidas radiales sin llegar a aplicar medidas longitudinales en la zona de avance;
- si, por el contrario, el estado de tensiones es alto, entonces será necesario actuar, sobre todo, en la zona de avance, reforzándola con medidas longitudinales, sin tener que hacer uso de medidas radiales después del paso del frente. Si un medio se encuentra sometido a tensiones en la gama de rotura, es imprescindible reforzar la zona de avance mediante el preconfiamiento de la futura cavidad.

Esto se puede complementar con medidas de confinamiento apropiadas ejecutadas a partir del frente. En estos casos, la experiencia (y la que se describe en estos párrafos es particularmente significativa) aconseja:

- trabajar por delante del frente respetando la *forma* y el *volumen* de la zona de avance creando una corona de terreno mejorado a su alrededor. Durante la construcción del túnel de Basto se empleó esta forma de trabajo de manera muy efectiva durante el avance a través de terreno especialmente difícil.

Si esto no fuera suficiente, entonces sería necesario:

- llevar a cabo, adicionalmente, una mejora radial del terreno alrededor de la cavidad de unas dimensiones suficientes como para absorber la convergencia residual que la zona de avance, aun reforzada, no es capaz de evitar por sí misma.

En el último caso, la relación entre las intervenciones en la zona de avance y en la cavidad, decidida en la fase de diseño, se puede ajustar durante la construcción.

2.5. La zona de avance como herramienta de estabilización

Los resultados de la investigación se pueden resumir muy brevemente de la siguiente forma:

- durante la **primera fase de investigación** se identificaron fundamentalmente tres tipos de deformación (extrusión del frente, preconvergencia y convergencia) y sus correspondientes manifestaciones de inestabilidad (desplome del terreno, descostramiento, rotura del frente y colapso de la cavidad);
- en la **segunda fase de investigación** se obtuvo la constatación experimental de que el comportamiento de deformación (extrusión del frente, preconvergencia y convergencia) y las manifestaciones de inestabilidad visibles desde el interior de la cavidad, como resultado de la deformación (desplome de terreno, descostramiento, rotura del frente y colapso de la cavidad), dependían directa o indirectamente de la *rigidez de la zona de avance*;
- en la **tercera fase de investigación** se experimentó para averiguar cómo era posible emplear la zona de avance como *herramienta de estabilización* actuando artificialmente sobre su rigidez para regular la deformación de la cavidad.

Los resultados de la investigación fueron los siguientes:

- se confirmó que la respuesta del medio a la acción de la excavación debe ser la cuestión a la que el proyectista de túneles debe prestar más atención ya que, entre otras cosas, es un indicador del inicio y posición del efecto arco o, en otras palabras, del nivel de estabilidad alcanzado por el túnel;
- la respuesta de deformación se inicia por delante del frente en la zona de avance y se desarrolla hacia atrás, a partir de él a lo largo de la cavidad y no se trata únicamente de convergencia, sino que se compone de extrusión, preconvergencia y convergencia. La convergencia es sólo la última etapa de un complejo proceso de tensión-deformación;
- existe una conexión directa entre la respuesta de deformación del sistema frente-zona de avance y la de la cavidad en el sentido de que la última es consecuencia directa de la primera; se debe subrayar la importancia de monitorizar la respuesta de deformación del sistema frente-zona de avance y no únicamente la de la cavidad;
- se demostró que es posible controlar la deformación de la zona de avance (extrusión, preconvergencia) y, en consecuencia, también la deformación de la cavidad (convergencia) actuando sobre la rigidez de la zona de avance aplicando medidas de protección y refuerzo.

En conclusión, los resultados de la investigación permiten considerar la zona de avance como una *nueva herramienta de estabilización* de la cavidad a corto y largo plazo: un instrumento cuya resistencia y susceptibilidad a la deformación juegan un papel determinante ya que es capaz de condicionar la cuestión que debe preocupar a los proyectistas de túneles por encima de cualquier otra: **el comportamiento de la cavidad a la llegada del frente.**

3. LA ZONA DE AVANCE COMO PUNTO DE REFERENCIA DE LAS ESPECIFICACIONES DEL TÚNEL

Si la zona de avance resulta una herramienta efectiva para la estabilización de una cavidad a corto y largo plazo, capaz de condicionar su comportamiento a la llegada del frente, se puede decir que los proyectistas de túneles deben dirigir toda su atención a las propiedades tenso-deformacionales, o lo que es lo mismo, a la estabilidad del sistema frente-zona de avance, si pretenden realizar diseños capaces de garantizar la estabilidad de un túnel a largo y corto plazo.

Por lo tanto, la estabilidad del sistema frente-zona de avance se puede considerar como un punto de referencia para la estandarización de las especificaciones, con la ventaja de tratarse de un indicador que conserva la validez para todos los tipos de terreno en todas las condiciones de equilibrio.

En este contexto, las tres condiciones fundamentales de tensión-deformación en el sistema frente-zona de avance, ya descritas anteriormente (vease también la Fig. 13), a su vez, identifican tres posibles tipos de comportamiento de la cavidad (Fig. 14):

- S comportamiento de frente estable (categoría de comportamiento A);
- S comportamiento de frente estable a corto plazo (categoría de comportamiento B);
- S comportamiento de frente inestable (categoría de comportamiento C).

Cuando existe un comportamiento de frente estable, la estabilidad global del túnel está prácticamente

garantizada, incluso en ausencia de intervenciones de estabilización. En las situaciones B) y C), los resultados de la investigación indican que, de cara a prevenir la inestabilidad del frente y, por tanto, la de la cavidad, e intentar recuperar las condiciones de frente estable A), deben adoptarse medidas de preconfiamiento convenientemente equilibradas entre el frente y la cavidad de una intensidad adecuada a las condiciones reales de tensión con respecto a las propiedades resistentes y de deformación del medio.



Figura 14. Definición de las categorías de comportamiento del frente.

La aplicación de estos conceptos en la práctica del diseño y la construcción han permitido al autor conseguir numerosos y significativos éxitos. La Fig. 15 agrupa los gráficos de los ritmos de avance obtenidos durante la excavación de túneles diseñados y construidos en Italia durante los últimos 10 años, bajo una gama extremadamente extensa de condiciones geológicas y estados de tensiones [2]. Lo que sorprende de esta figura no son únicamente los altos ritmos medios de avance en relación al tipo de terreno involucrado, sino, sobre todo, la linealidad de los ritmos, un indicador del tipo de construcción industrial ejecutado en etapas regulares y sin interrupciones.

En este punto pareció necesario y urgente llevar el conocimiento adquirido a su último extremo y desarrollar un planteamiento constructivo y de diseño que se aproximara más a la realidad que los que son de uso habitual.

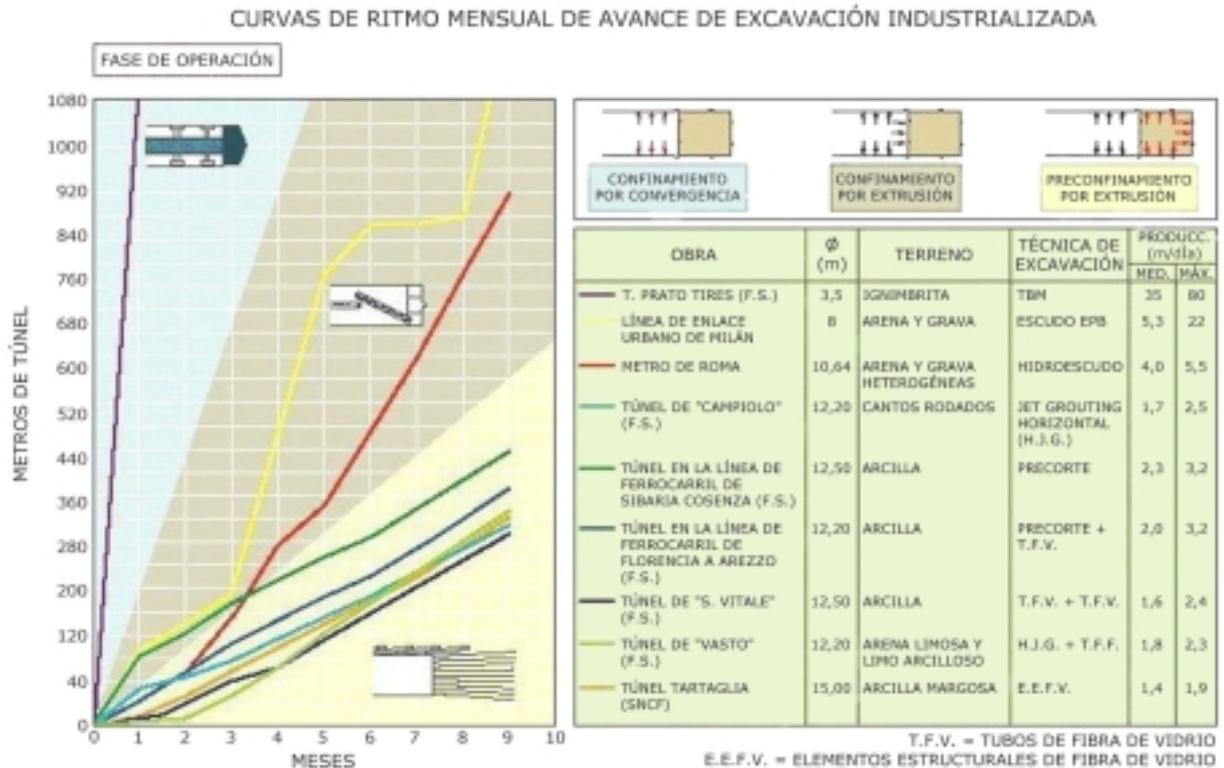


Figura 15. Ritmos de avance en diferentes túneles.

Para conseguir esto siguiendo las líneas de la investigación ya realizada y para completarla, se tenía que iniciar un programa adicional de estudio, tanto teórico, como experimental, en el que el comportamiento tenso-deformacional de la zona de avance comparado sistemáticamente con el de la cavidad se estudiara en términos de estabilidad y deformación, con y sin intervenciones de refuerzo y protección.

El sistema A.DE.CO.-RS (Análisis de la Deformación Controlada en Rocas y Suelos) (Fig.16) se creó a partir de estos estudios, culminándolos.

Desde este planteamiento, se observa:

- que los fenómenos involucrados en la excavación de un túnel se pueden reducir a un proceso de causa-efecto (acción-reacción);
- que, normalmente, es necesario primero identificar perfectamente la causa para poder controlar eficazmente el efecto de este tipo de procesos;
- que la identificación completa de la causa debe necesariamente suponer un análisis en profundidad del efecto.

Se presta atención al último (respuesta de deformación del terreno) tanto por delante, como por detrás del frente:

- *analizando* primero su génesis y desarrollo por medio de experimentos a escala natural y en laboratorio, así como con herramientas matemáticas enfocadas al comportamiento de la zona de avance; se puede identificar la causa estudiando las propiedades de deformación del terreno por delante del frente y, posteriormente,
- *controlando* la susceptibilidad del terreno a la deformación por delante del frente (zona de avance) mediante técnicas apropiadas de estabilización; se deduce que es posible también controlar así la respuesta de deformación del terreno, lo que prueba, sin lugar a dudas, que aquella es la verdadera causa del proceso que se está examinando.



Figura 16. Sistema A.DE.CO.-RS.

4. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE DEFORMACIÓN DE ACUERDO CON EL SISTEMA A.DE.CO.-RS

Se analizó el comportamiento de tensión-deformación de la zona de avance, comparándolo sistemáticamente con el de la cavidad en términos de estabilidad y deformación con y sin intervenciones de estabilización (de protección o refuerzo), empleando una serie de observaciones y medidas tanto *in situ*, como en el laboratorio.

4.1. Experimentación a escala real

Se analizó, mediante su observación, el comportamiento de la zona de avance en **términos de estabilidad**. Se clasificaron más de 1000 frentes de túnel y los datos resultantes se resumieron en tarjetas especiales.

En **términos de deformación**, por otro lado, se estudió la zona de avance efectuando mediciones sistemáticas de (Fig. 17):

- la extrusión, instrumentando la zona de avance con medidores de extrusión (micrómetros deslizantes) de

una longitud igual a dos o tres veces el diámetro de la excavación. Éstos proporcionaron, en términos absolutos, la deformación longitudinal del terreno que conformaba la zona de avance, tanto en función del tiempo (fase estática, frente detenido), como en función del avance del frente (fase dinámica) (Fig. 18);

- la representación topográfica, en términos absolutos, del frente, por medio de puntos de referencia ópticos, en paradas del avance del frente;
- la preconvergencia medida desde la superficie, siempre que la morfología de la superficie y el tamaño del recubrimiento lo permitieron, colocando extensómetros multipunto insertados verticalmente en el terreno, antes de la llegada del frente, por encima de la corona y a los lados de los hastiales del túnel a ser excavado [3].

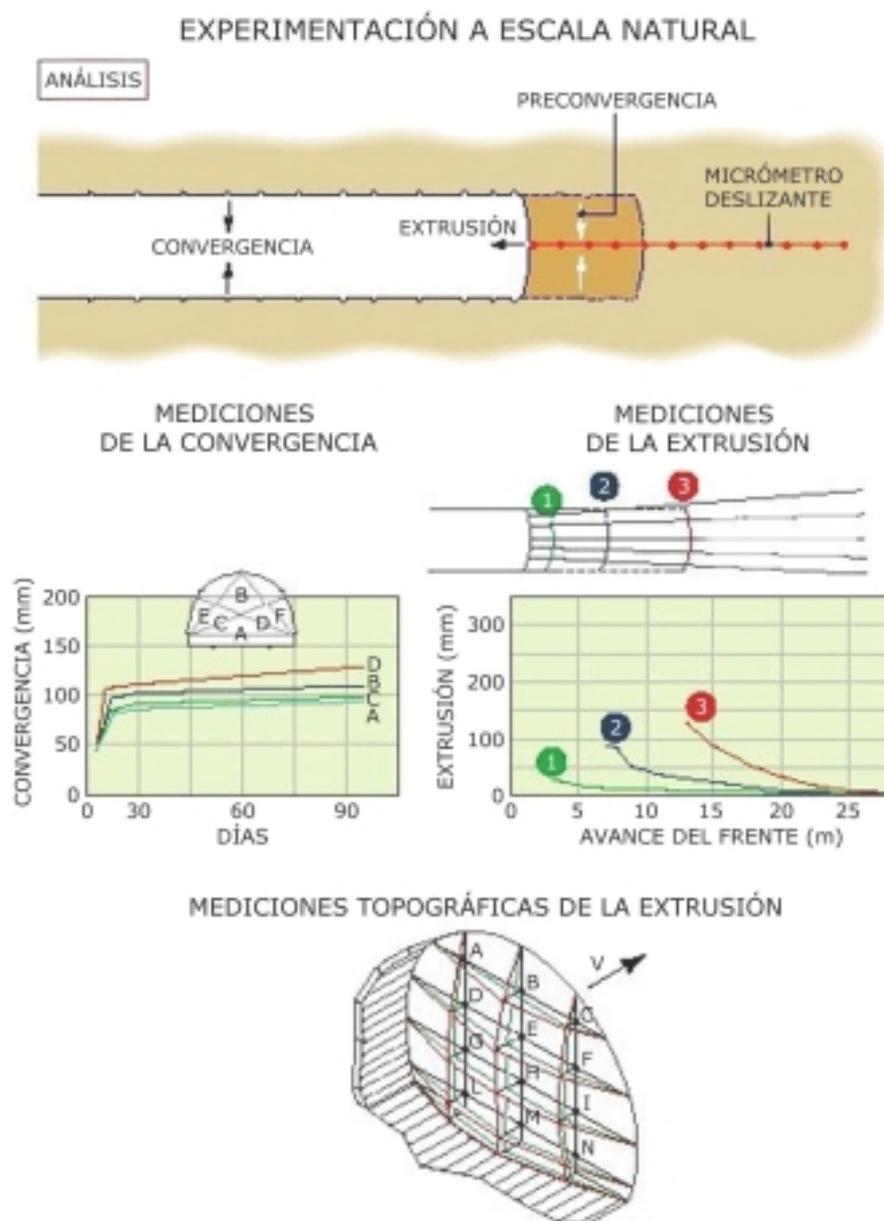


Figura 17. Experimentación a escala real.

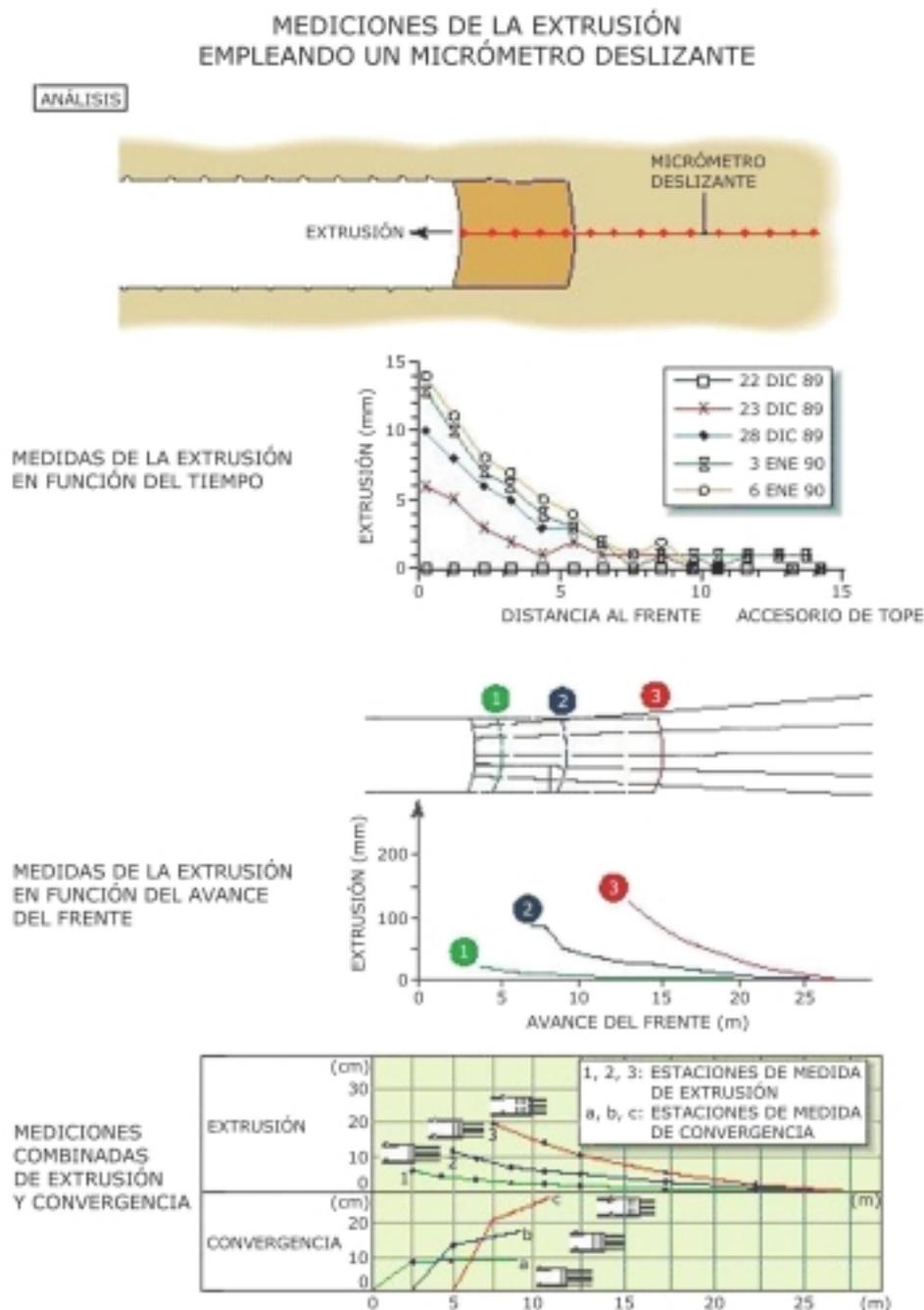


Figura 18. Medidas de la extrusión mediante micrómetros deslizantes.

Estas mediciones, naturalmente, estuvieron siempre acompañadas de mediciones tradicionales como la de la convergencia y las de las tensiones en los revestimientos.

La experimentación a tamaño natural permitió conseguir lo siguiente:

- confirmar, mediante la construcción de diagramas especiales de extrusión-convergencia, (Fig. 18) la existencia de una íntima correlación entre el concepto de extrusión en la zona de avance y el de

convergencia que se manifiesta tras el paso del frente y, también, cómo ambos disminuyen según aumenta la rigidez de la zona de avance;

- establecer que la zona de avance se extruye a través de la pared del frente (extrusión de la superficie) con tres tipos diferentes de deformación (cilíndrica, corona esférica y combinada), en función del material afectado y del estado de tensiones a que se encuentre sujeto;
- calcular en términos absolutos la preconvergencia, empleando cálculos volumétricos simples que se pueden fácilmente llevar a cabo por medio de tablas, incluso cuando no es posible medirla directamente desde la superficie (Fig. 19);
- verificar que, según aumenta el preconfiamiento de la cavidad y se reduce la capa de terreno plastificado alrededor de la cavidad hay, como consecuencia, una carga proporcionalmente menor sobre los sostenimientos primario y secundario.

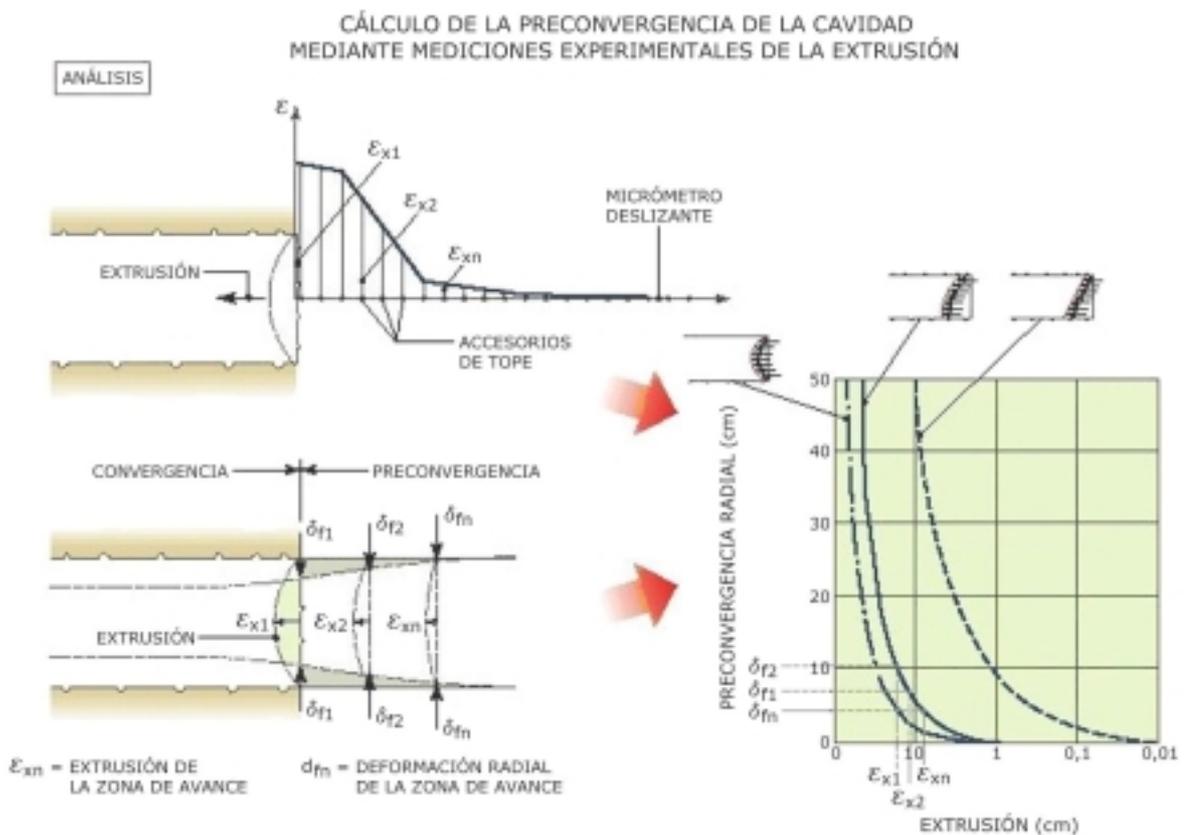


Figura 19. Cálculo de la preconvergencia de la cavidad usando medidas experimentales de la extrusión.

4.2. Experimentación en laboratorio

Debido a que los ensayos de extrusión ya existentes, inventados por Brims y Bennemark en 1967 estudiaban el fenómeno, únicamente, en términos de umbrales de inicio, se desarrollaron dos nuevos tipos de ensayo con el objetivo de analizar la evolución del fenómeno (Fig. 20):

- el ensayo de extrusión en célula triaxial
- el ensayo centrífugo de extrusión.

En el **ensayo de extrusión en célula triaxial**, se inserta la muestra de terreno en una célula y se recrea el estado original de tensiones σ_0 del macizo rocoso. Se emplea entonces la presión del fluido también para reproducir el estado de tensiones en el interior de un volumen cilíndrico especial denominado “cámara de extrusión” extraído del interior de la muestra antes del ensayo. La cámara es coaxial con la muestra y simula la situación de un túnel alrededor del frente.

Manteniendo constante el estado de tensiones alrededor de la muestra y reduciendo gradualmente la presión P_f del fluido dentro de la cámara de extrusión, se obtiene una simulación realista del descenso gradual de la tensión que se produce en el medio para una sección transversal dada del túnel según se aproxima el frente. Se obtiene una previsión de la extrusión en el frente en función del tiempo o en función de la reducción de la presión de confinamiento P_i , con unas curvas similares a las de la Fig. 20. Se pueden emplear inmediatamente en la fase de diseño para calcular la presión de confinamiento necesaria para garantizar una rigidez dada de la zona de avance y, en consecuencia, el deseado control de la preconvergencia.

Se pueden formular algunas consideraciones a partir de los numerosos ensayos de extrusión realizados en célula triaxial:

1. dadas las modestas dimensiones de la muestra, estos ensayos son válidos para la matriz del terreno, que debe ser, principalmente, arcillosa;
2. cualesquiera elementos no uniformes del terreno (esquistos o *scaliness*) únicamente proporcionan resultados aceptables si su tamaño es despreciable con respecto al de la muestra;
3. cuanto más homogéneo es el terreno, mayor es la probabilidad de que los resultados sean aplicables a la situación a escala natural.

Los **ensayos centrífugos de extrusión** se desarrollaron y realizaron para aquellos casos en los que la gravedad tiene una influencia significativa sobre la extrusión. El empleo de estos ensayos está limitado a unos pocos casos específicos debido a su complejidad y a su elevado coste.

Se insertan en la muestra de terreno marcadores especiales y transductores para la medida de la deformación y de la presión intersticial, y a continuación se coloca en una caja especial con una pared transparente. Después de haber extraído la cavidad que representa el túnel, se inserta un tubo de acero que representa una primera aproximación del sostenimiento preliminar, con bóveda y contrabóveda. La célula así obtenida se llena de fluido mantenido bajo presión. La presión geostática se recrea entonces en la centrifugadora a la vez que se reduce la presión en la célula para simular la excavación en el frente.

Los resultados obtenidos (la Fig. 20 proporciona los de un ensayo centrífugo de extrusión realizado en una muestra reconstruida de terreno) muestran que la extrusión en el frente se manifiesta rápidamente desde el momento en que la presión se libera, y se desarrolla con velocidad creciente según progresa la relajación de la zona de avance. La figura muestra, tanto la extrusión instantánea, como la viscosa separadamente para cada etapa de liberación de presión. La figura muestra claramente que la última supone el 50 % de la extrusión total al final del ensayo.

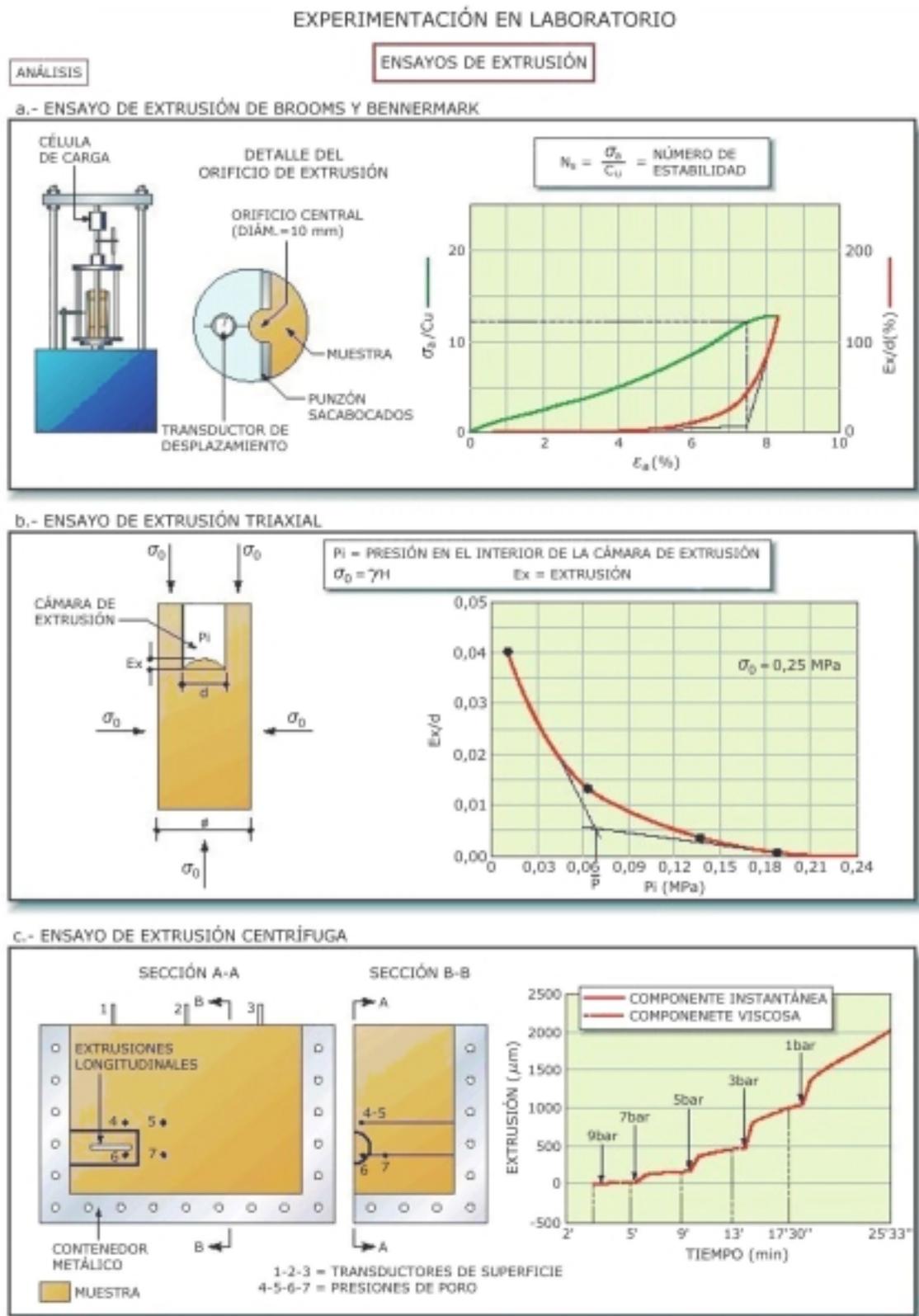


Figura 20. Experimentación en laboratorio.

La experimentación en el laboratorio, mediante la reproducción del fenómeno de la extrusión de la zona de avance, junto con los resultados de las mediciones a escala natural, resultó fundamental para dar los valores adecuados a los parámetros geomecánicos de resistencia y deformación (c , ϕ , E) en los modelos matemáticos empleados en la parte teórica de nuestro análisis del control de las respuestas de deformación.

4.3. Análisis numérico

La complejidad de los mecanismos que se inician por delante del frente y la dificultad inicial para identificar criterios objetivos de predicción del comportamiento tenso-deformacional de la zona de avance, que se mueven entre la intuición y la experiencia práctica, supusieron la realización de un esfuerzo para producir una interpretación orgánica y unitaria de los numerosos aspectos investigados que, a su vez, proporcionaría un entramado teórico capaz de superar los límites de las teorías actuales.

Para conseguir esto, proseguimos con nuestro estudio de la respuesta de deformación empleando herramientas teóricas. Se emplearon tres planteamientos diferentes:

- inicialmente, intentamos hacer uso de las teorías de cálculo existentes, actualizándolas donde fue necesario;
- intentamos entonces resolver el problema mediante modelos matemáticos de elementos finitos y diferencias finitas axialmente simétricos;
- finalmente recurrimos a la modelización matemática tridimensional.

4.3.1. Estudios que empleaban planteamientos analíticos

Para comenzar, intentamos resolver el problema modificando y actualizando cálculos analíticos existentes. En particular intentamos introducir el concepto de la zona de avance y de su refuerzo en algunas de las fórmulas clásicas empleadas para el diseño de túneles como, por ejemplo, el Método de Convergencia-Confinamiento [4] y el Método de la Línea Característica [5], siendo éste el único en el que el concepto de zona de avance aparece explícitamente.

Ambos métodos nos permitieron simular los efectos de la mejora del terreno de la zona de avance y reproducir alguno de nuestros resultados experimentales, la reducción resultante del radio de plastificación R_p y la deformación de la zona alrededor del frente.

Debido a la separación en los cálculos entre la situación de tensión-deformación en el frente y la existente a cierta distancia de él, ninguno de los dos métodos puede mantener memorizados los efectos de lo que ha ocurrido por delante del frente en ecuaciones que son válidas para la zona situada por detrás del frente. Consecuentemente, no son capaces de interpretar ni representar correctamente todos los fenómenos en conjunto [6].

Los fenómenos a los que se hace referencia son la disminución en el radio de plastificación R_p y la consecuente reducción en la deformación de la cavidad (convergencia) así como en las cargas aplicadas sobre los sostenimientos preliminar y final. Estos fenómenos no se encontraron entre los resultados obtenidos

empleando los métodos analíticos considerados, a pesar de haber sido observados sistemáticamente en las medidas experimentales [6].

Nos encontramos entonces forzados a concluir estos planteamientos que, aun resultando útiles en la fase de diagnóstico para definir el comportamiento del terreno durante su excavación en ausencia de preconfiamiento, no son aplicables durante la fase de tratamiento, en la que se emplea el preconfiamiento. Esto se debe a que no pueden realizar con suficiente precisión ni la predicción de la deformación de la cavidad, ni el cálculo de los sostenimientos primario y secundario.

Se decidió, por tanto, abandonar este tipo de planteamientos y emprender el camino de los modelos numéricos (elementos finitos y diferencias finitas), que son capaces de tener en cuenta la historia de tensión-deformación completa del medio alrededor de la excavación, tanto por delante del frente, como por detrás de él.

4.3.2. Estudios que empleaban modelos numéricos

Se investigó entonces el efecto de mejorar el terreno de la zona de avance mediante modelos de elementos finitos y diferencias finitas. Empezamos usando modelos simétricos con respecto al eje ya que eran más fáciles de manejar que los modelos tridimensionales.

Aunque no fuimos capaces de superar algunas de las limitaciones intrínsecas de los métodos analíticos mencionados anteriormente, (túnel perfectamente circular, estados de tensiones uniformes en el terreno circundante, imposibilidad de considerar sostenimientos diferentes de los de anillo cerrado y, por tanto, de simular las etapas reales de construcción), el empleo de estos modelos mostró, sin embargo, que el refuerzo del terreno de la zona de avance produce una distribución diferente de tensiones por delante del frente y alrededor del túnel. Esto confirmó, finalmente, a partir de los cálculos, que el refuerzo del terreno que conforma la zona de avance supone una reducción de la extensión de la capa de terreno plastificado y de toda la deformación alrededor del túnel (no sólo la extrusión y la preconvergencia, sino también la convergencia), tanto por delante, como por detrás del frente. Además, los análisis realizados empleando modelos simétricos axialmente mostraron que no es posible controlar la extrusión y la preconvergencia variando únicamente la rigidez de los sostenimientos y/o la distancia desde el frente a la que se colocan. En otras palabras, demostraron que resulta imposible remediar lo que ya ha pasado por delante del frente actuando únicamente sobre el sostenimiento.

Aunque los modelos axialmente simétricos mostraron una capacidad discreta para simular el avance del túnel con el terreno de la zona de avance reforzado y proporcionaron resultados de tensión y deformación del terreno en línea con los hallazgos de la investigación experimental, no mostraron la misma capacidad para predecir cargas sobre los sostenimientos primario y secundario que, con este tipo de modelo, hubieran resultado más o menos equivalentes a los que hubieran resultado sin el refuerzo de la zona de avance, manteniendo el resto de las condiciones constantes.

Esto contrasta, como ya se ha indicado, con las observaciones realizadas durante la investigación experimental y que se han confirmado en la práctica en repetidas ocasiones durante la construcción. Esto se debe a la imposibilidad de tener en cuenta en este tipo de modelos los efectos de la gravedad producidos por el terreno plastificado que circunda el túnel, ni las etapas reales de construcción que supone la instalación de los sostenimientos primario y secundario.

4.3.3. Estudios empleando modelos tridimensionales

Para superar las contradicciones encontradas con los modelos numéricos axialmente simétricos, se recurrió a la modelización numérica tridimensional. Con este método era posible, de hecho, introducir la geometría real del túnel en los cálculos, de tal forma que ya no era circular, como en el caso de los métodos de convergencia-confinamiento, de la línea característica y de los axialmente simétricos (elementos finitos o diferencias finitas).

Es también posible considerar los estados de tensiones del terreno que no son de tipo hidrostático, tener en cuenta las cargas gravitacionales y también los efectos que tienen las diferentes etapas constructivas en la estática del túnel simulando la geometría real de las estructuras de sostenimiento y la secuencia y distancia a la que se colocan.

Los resultados obtenidos de los modelos generalmente concuerdan bien con las observaciones experimentales, tanto en lo que se refiere a deformación (extrusión, preconvergencia y convergencia), como respecto a las tensiones en los sostenimientos, que resultan inferiores cuando se refuerza la zona de avance, como se observó en la fase experimental.

4.3.4. Resultados del estudio teórico de la respuesta de deformación

Los análisis experimental y teórico de la respuesta de deformación *empleando la zona de avance como medio clave para interpretar los fenómenos de deformación en túneles a largo y a corto plazo*, nos permitió identificar con certeza las propiedades resistentes y de deformación de la zona de avance como verdadera causa de todo el proceso de deformación (extrusión, preconvergencia y convergencia). También confirmó, más allá de cualquier duda razonable, que es posible controlar la deformación de la zona de avance (extrusión, preconvergencia) rigidizándola mediante técnicas de protección y refuerzo y, en consecuencia, también controlar la respuesta de deformación de la cavidad (convergencia), así como la magnitud de las cargas sobre el sostenimiento del túnel a corto y largo plazo.

Consecuentemente, si las propiedades resistentes y de deformación de la zona de avance constituyen la verdadera causa de la respuesta de deformación del terreno frente a la excavación, es posible considerarla como una nueva herramienta para controlar esa respuesta: un instrumento cuyas propiedades de resistencia y deformación juegan un papel determinante a largo y corto plazo en la estabilidad de la cavidad.

5. EL CONTROL DE LA RESPUESTA DE DEFORMACIÓN DE ACUERDO CON EL SISTEMA A.DE.CO.-RS

Las investigaciones teórica y experimental de la respuesta de deformación del terreno muestran que la verdadera causa de todo el proceso de tensión-deformación (extrusión, preconvergencia y convergencia) que se inicia al excavar un túnel es la susceptibilidad de la zona de avance a la deformación. Se deduce, por tanto que, para tener éxito bajo cualesquiera condiciones de tensión-deformación pero, sobre todo, en terreno difícil, se debe actuar primero sobre la zona de avance para regular su rigidez adecuadamente. En términos de fuerzas, esto significa emplear el preconfinamiento y no únicamente el confinamiento, definiendo el preconfinamiento como cualquier acción activa que favorece la formación de un efecto arco en el terreno por delante del frente.

Por lo tanto, se debe conseguir el control absoluto de la respuesta de deformación del terreno (Fig. 21):

1. por delante del frente, regulando la rigidez de la zona de avance aplicando técnicas de preconfiamiento adecuadas;
2. por detrás del frente, en la cavidad, regulando la forma en la que la zona de avance se extruye, mediante técnicas de confinamiento en el interior del túnel, capaces de proporcionar un confinamiento continuo y activo de la cavidad en las proximidades de frente.

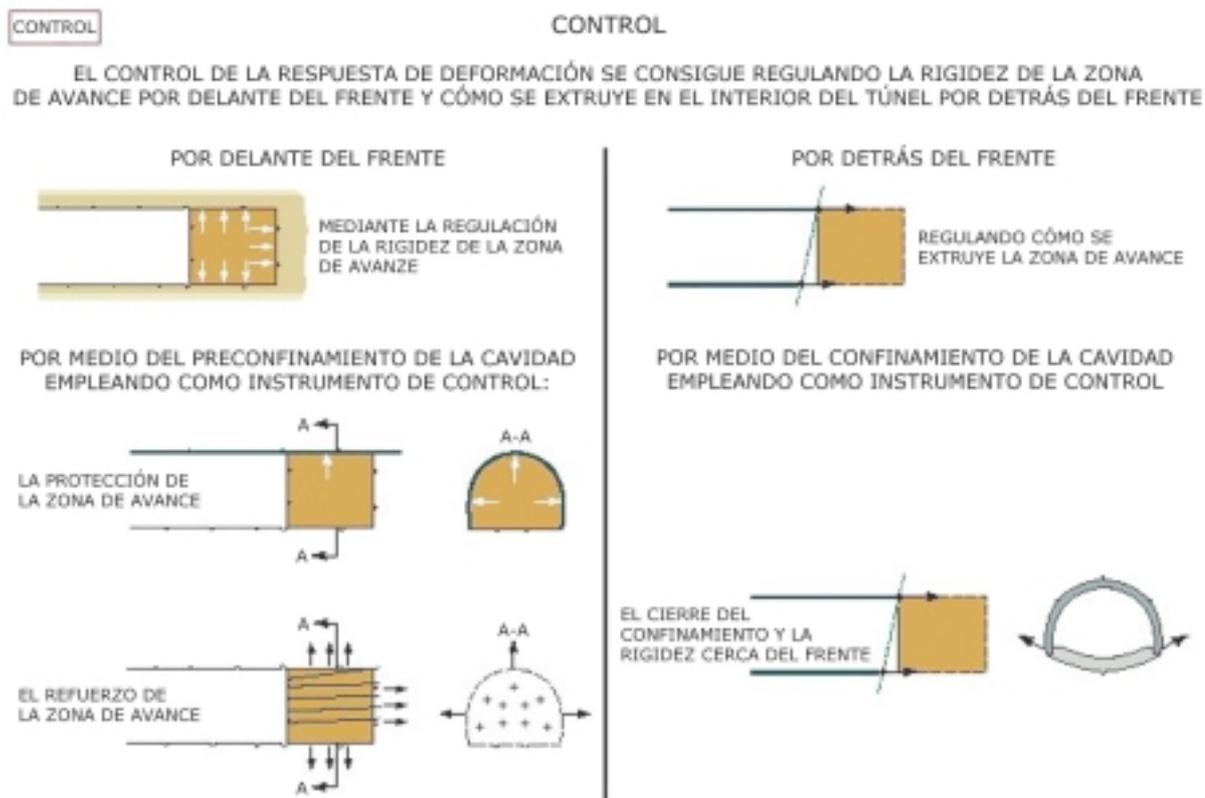


Figura 21. Control.

5.1. Control por delante del frente

Para regular la rigidez de la zona de avance y conseguir así las condiciones adecuadas para el control absoluto de la respuesta de deformación del terreno y, por lo tanto, en el análisis final, para la completa estabilización del túnel a largo o corto plazo, el sistema A.DE.CO.-RS propone, como se verá, numerosos tipos de intervención perfectamente ilustradas en diversos artículos, algunos de los cuales se indican en la Bibliografía [7].

Todos estos tipos de intervenciones se pueden dividir en dos únicas categorías (Fig. 22):

- *intervención protectora*, cuando la intervención canaliza las tensiones alrededor de la zona de avance

desempeñando una función protectora que asegura la conservación de las propiedades naturales de resistencia y deformación de la zona de avance (por ejemplo, los escudos de terreno mejorado mediante *jet-grouting* subhorizontal, escudos de hormigón proyectado o encofrado reforzados con fibra aplicados en el avance del frente mediante precorte mecánico);

- *intervención de refuerzo*, cuando la intervención actúa directamente sobre la consistencia de la zona de avance para mejorar sus propiedades naturales de resistencia y deformación por medio de técnicas adecuadas de mejora del terreno (por ejemplo, el refuerzo de la zona de avance por medio de elementos estructurales de fibra de vidrio).

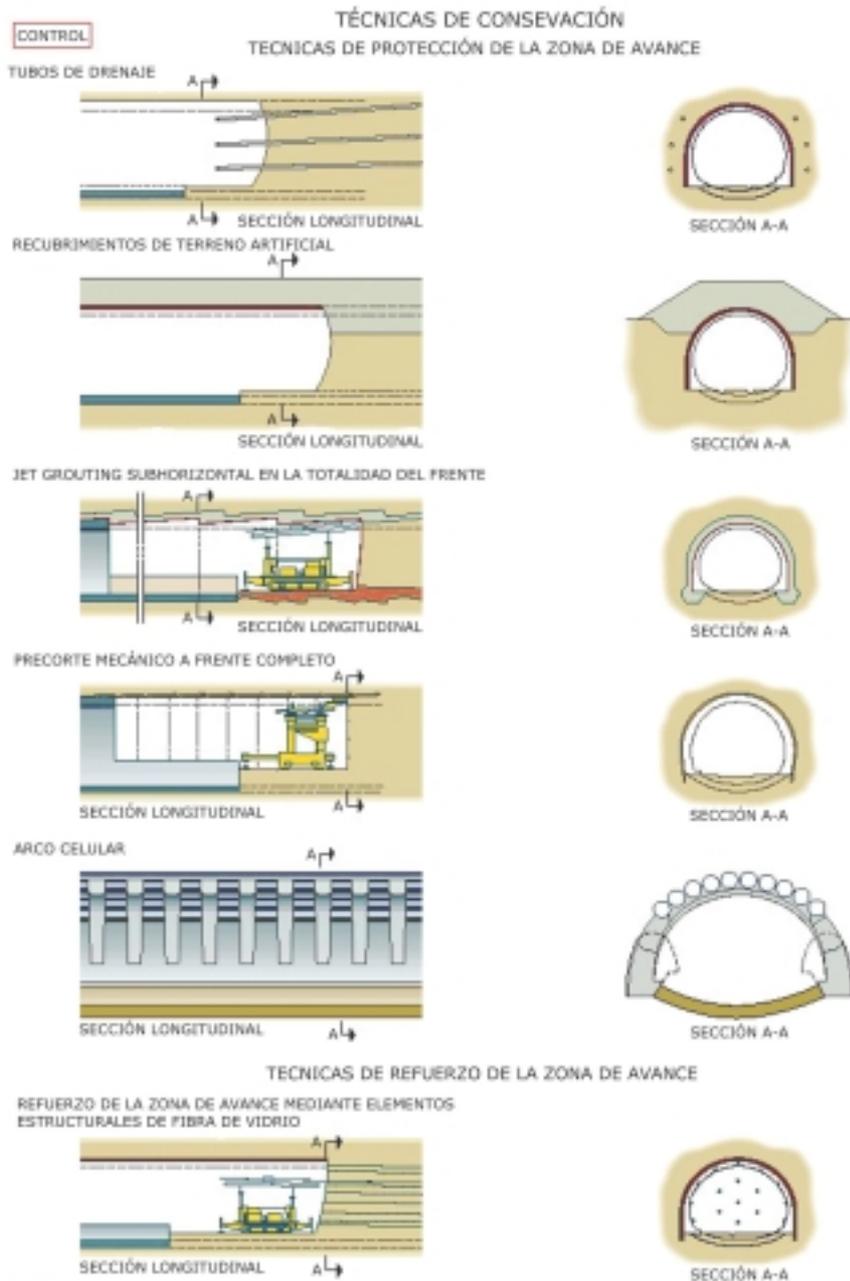


Figura 22. Técnicas de protección y refuerzo.

Aunque estos tipos de intervención para controlar la respuesta de deformación por delante del frente tienen un campo de actuación bastante definido en relación con la naturaleza del terreno cuando se consideran individualmente, consideradas en conjunto, son capaces de garantizar soluciones para todas las posibles condiciones geotécnicas. Naturalmente, en condiciones límite de tensión-deformación, no hay razón por la que no se puedan emplear dos o más tipos de intervención simultáneamente para obtener una acción mixta de protección y refuerzo (Fig. 23).

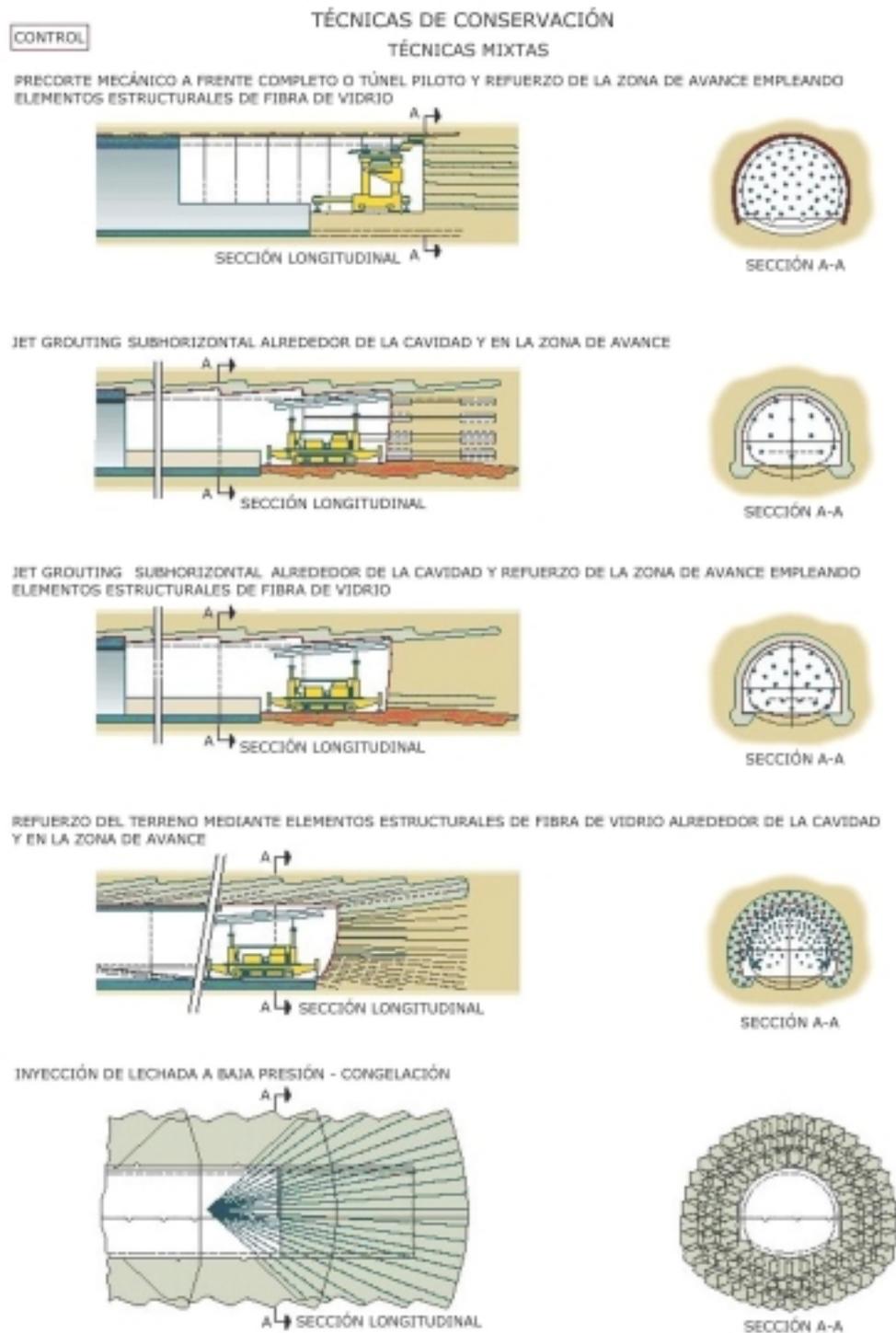


Figura 23. Técnicas mixtas.

5.2. Control por detrás del frente

En contra de las enseñanzas de los principios tradicionales de avance de túneles, que ignoran la causa de la deformación permitiendo a la zona de avance deformarse y que, por tanto requieren de la instalación de sostenimientos flexibles para absorber una deformación que ya se ha iniciado (práctica que, en condiciones realmente difíciles de tensión-deformación, frecuentemente se vuelve inadecuada), la aplicación de estos conceptos en el avance de túneles, en presencia de las condiciones de rigidez de la zona de avance característica del sistema A.DE.CO.-RS, requiere el empleo de sostenimientos igualmente rígidos como condición absolutamente esencial, si no se quiere perder, por detrás del frente, la ventaja obtenida con el refuerzo de la zona de avance. También es igualmente importante que se cuide y se preste atención a asegurar que *la continuidad de la acción de paso de preconfinamiento a confinamiento se realiza tan uniforme y gradualmente como sea posible, sin olvidar nunca que la causa de todo el proceso de deformación que se debe controlar radica en las propiedades resistentes y de deformación de la zona de avance.*

Por otro lado, los análisis numéricos realizados por ordenador muestran de una forma extremadamente clara que:

1. Cuando se produce la extrusión, lo hace a través de una superficie ideal denominada **superficie de extrusión**, que se extiende desde el punto de contacto entre el terreno y el extremo delantero del sostenimiento inicial y el punto de contacto entre el terreno y el extremo delantero de la contrabóveda (Fig. 24);

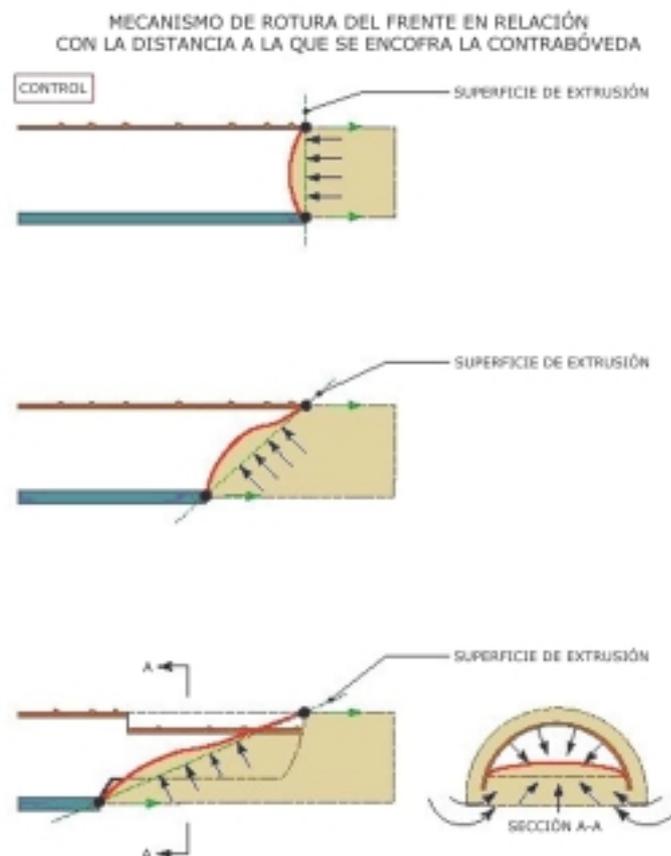


Figura 24. Mecanismos de rotura del frente según la distancia a la que se encuentre la contrabóveda.

2. Encofrar la contrabóveda del túnel más cerca del frente reduce progresivamente la superficie de extrusión produciendo, de esta forma, un descenso igualmente progresivo de la extrusión (que tiende a desarrollarse más simétricamente sobre la altura del frente) y, por lo tanto, también de la convergencia (Fig. 25).

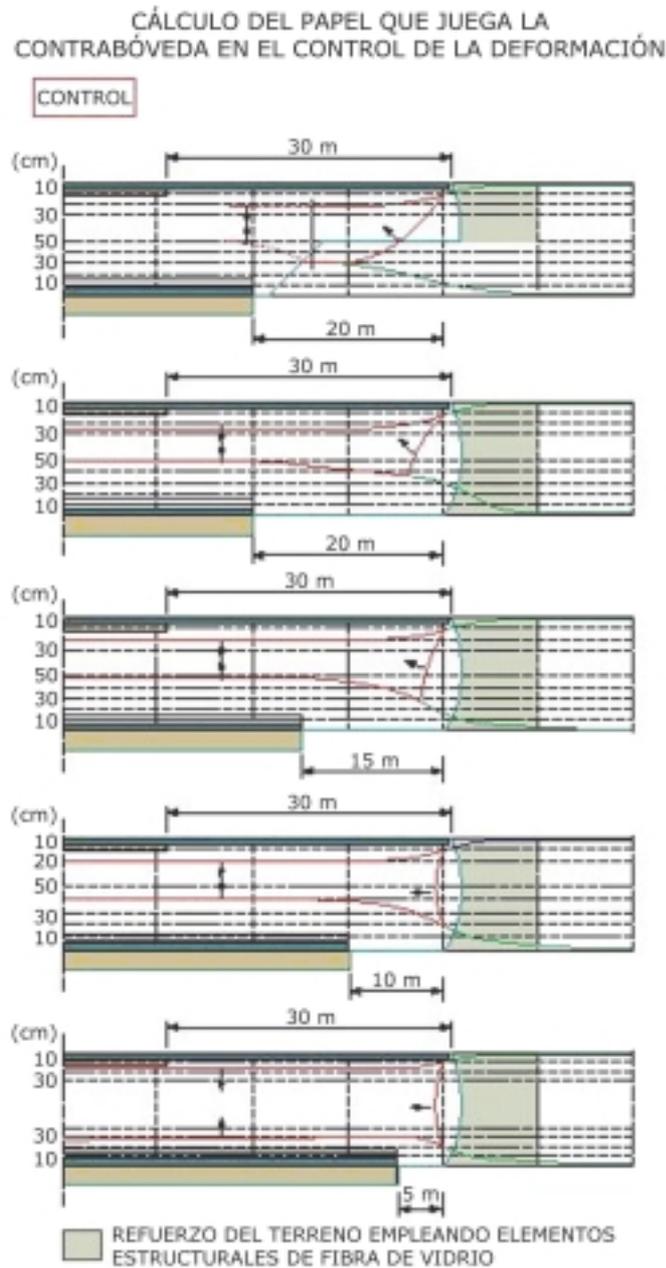


Figura 25. Cálculo de la deformación en función de la situación de la contrabóveda.

Los mismos análisis numéricos mostraron también que:

- Con la contrabóveda encofrada a la misma distancia del frente, la deformación calculada para un avance a media sección es comparable con la que se obtiene para un avance a sección completa (en otras

palabras, encofrar la contrabóveda del túnel a gran distancia del frente es equivalente a realizar un avance por etapas con avances a sección parcial);

- El avance a media sección siempre produce mayor deformación total que el avance a sección completa.
- Se deduce, por tanto, que el ingeniero proyectista del túnel tiene la posibilidad (que adquiere vital importancia en condiciones extremas de tensión-deformación) de llevar a cabo la acción que controle la respuesta de deformación, ya iniciada por delante del frente, regulando la rigidez de la zona de avance, un proceso continuo consistente en encofrar los laterales y la contrabóveda tan cerca del frente como sea posible. No tomar esta medida, encofrando a mayor distancia del frente significa aceptar una mayor superficie de extrusión, una extrusión asimétrica y una zona de avance de mayores dimensiones más difícil de manejar, condiciones todas ellas que conducen a la inestabilidad del túnel (Fig. 26).

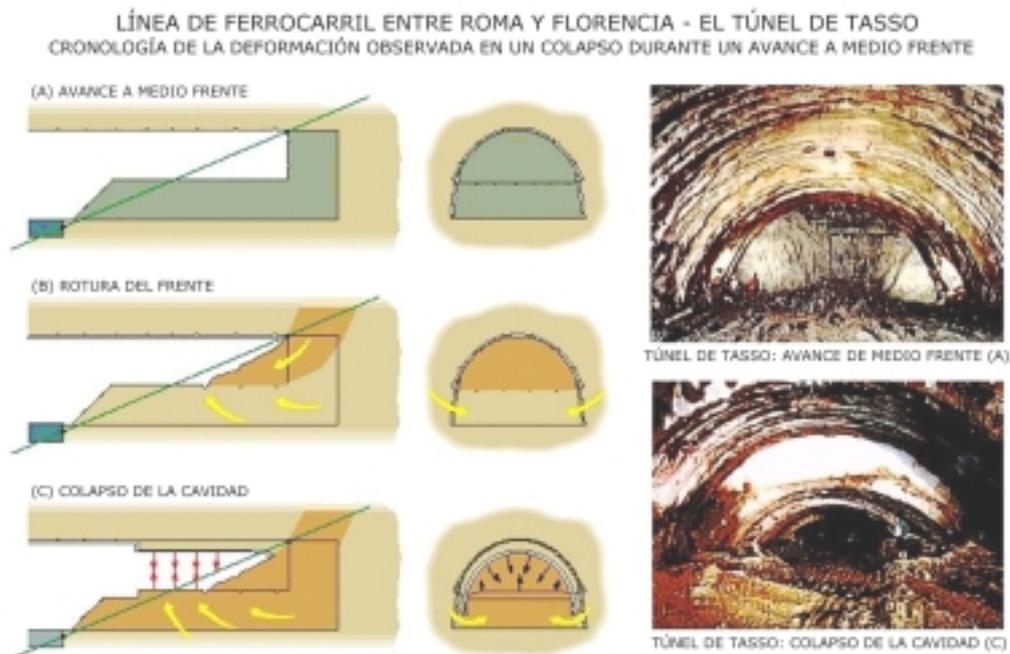


Figura 26. Túnel de Tasso.

En este punto llegó el momento de traducir los principios teóricos del A.DE.CO.-RS en un nuevo planteamiento de diseño y construcción de túneles que superara las limitaciones de los enfoques tradicionales e hiciera posible diseñar y construir túneles en todo tipo de terrenos y condiciones de tensión-deformación, para industrializar el avance de los túneles e incluso para hacer fiables las previsiones de tiempos y costes de construcción, que es lo normal en todos los demás tipos de proyectos de ingeniería civil. Antes de empezar, fue esencial el establecer unas guías de referencia para aquellos profesionales que fueran a acometer obras subterráneas.

6. PROPUESTA DE UN NUEVO PLANTEAMIENTO

Nos pareció razonable enunciar los siguientes puntos, que son fundamentales en el diseño y construcción de una obra subterránea:

- **en el momento del diseño:**

- S contar con un conocimiento detallado del medio en el que se va a trabajar, con especial énfasis en sus propiedades resistentes y de deformación;
- S llevar a cabo un estudio preliminar del comportamiento tenso-deformacional (respuesta de deformación) del medio a excavar en ausencia de medidas de estabilización;
- S definir el tipo de acción de confinamiento o preconfinamiento que se necesita para regular y controlar la respuesta de deformación del medio frente a la excavación;
- S seleccionar, entre las tecnologías existentes en el momento del proyecto, el tipo de estabilización en función del preconfinamiento o confinamiento que debe ser capaz de proporcionar;
- S diseñar las secciones tipo longitudinal y transversal en función de la respuesta prevista del medio a la excavación definiendo, no sólo las medidas de estabilización más adecuadas para el contexto en el que se espera vaya a operar sino, también, las etapas, pasos y tiempos en los que deben implementarse;
- S emplear herramientas matemáticas para determinar el alcance de las medidas estabilización que se seleccionaron y ensayarlas para obtener la respuesta deseada del medio a la excavación, así como el factor de seguridad para el trabajo;

- **en el momento de la construcción:**

- S verificar que la respuesta del medio a la excavación durante la construcción corresponde a la que se había previsto a partir de los estudios de la etapa de diseño. Proceder entonces a ajustar el diseño equilibrando la intensidad de las medidas de estabilización entre el frente y el perímetro de la cavidad.

Esto asegura que el diseño y la construcción de una obra subterránea debe necesariamente seguir la secuencia cronológica siguiente:

1. *una fase de estudio*, para obtener el conocimiento geomecánico, geológico e hidrogeológico del medio;
2. *una fase de diagnóstico*, que supone la previsión, empleando medios teóricos, del comportamiento del medio en términos de respuesta de deformación en ausencia de medidas de estabilización;
3. *una fase de tratamiento*, que supone, *inicialmente*, la definición del método de excavación y estabilización del medio empleados para regular la respuesta de deformación y *entonces* estimar, teóricamente, la efectividad a este respecto del método seleccionado;
4. *una fase de monitorización*, que supone la auscultación y la experimentación con la respuesta real del medio a la excavación, en términos de deformación, para ajustar de forma precisa los métodos de excavación y estabilización empleados.

6.1. Esquema conceptual de acuerdo con el sistema A.DE.CO.-RS

El planteamiento en que se basa el A. DE.CO.-RS difiere en varios aspectos importantes, algunos ya comentados en este capítulo, de otros métodos empleados hasta la fecha como pauta de referencia:

Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

- 1) el *diseño* y la *construcción* de un túnel ya no se consideran como antiguamente; ahora representan dos momentos bastante diferenciados con una fisonomía clara y bien definida en términos de tiempos y prácticas;
- 2) el sistema emplea un nuevo tipo de esquema conceptual para trabajos subterráneos basado en un único parámetro común para todas las excavaciones: el comportamiento de tenso-deformacional del sistema frente-zona de avance;
- 3) el sistema se basa en la predicción, auscultación e interpretación de la respuesta de deformación del macizo rocoso frente a la excavación y ésta se convierte en el único parámetro de referencia empleado. *Primero* se predice y regula teóricamente y, *entonces*, se mide empíricamente, interpretando y experimentando como medio de ajuste fino del diseño de la construcción que se está realizando;
- 4) el concepto de *preconfinamiento* se introduce para completar el ya bien conocido concepto de *confinamiento*; este complemento hace posible perforar túneles de forma programada, incluso en las condiciones estáticas más difíciles, sin tener que recurrir a la improvisación durante la construcción;
- 5) El planteamiento supone el empleo de *sistemas de conservación* orientados a mantener las propiedades geotécnicas y estructurales del terreno, entendido como "material de construcción", tan inalterado como sea posible, cuando esto juegue un papel fundamental en la velocidad y en el ritmo de avance del túnel.

Como ya se ha mencionado anteriormente, una característica particular de este planteamiento es el nuevo esquema conceptual aplicado a las obras subterráneas.

Se ha observado que la deformación del terreno durante la excavación y, por tanto, la estabilidad del túnel mismo, dependen del comportamiento del terreno que forma la zona de avance por delante del frente. Realizada esta observación, *la estabilidad del sistema frente-zona de avance* se emplea como elemento básico en el nuevo esquema conceptual. En consecuencia, haciendo referencia al único parámetro válido para todos los tipos de terreno (la respuesta de deformación de la zona de avance), el método supera las limitaciones de sistemas empleados hasta la fecha, especialmente cuando se encuentran suelos de poca consistencia.

Como ya se ha ilustrado, se pueden identificar tres categorías fundamentales de comportamiento (Fig. 14):

- Categoría A: frente estable, comportamiento de tipo rocoso;
- Categoría B: frente estable a corto plazo, comportamiento de tipo cohesivo;
- Categoría C: frente inestable, comportamiento de terreno suelto.

CATEGORÍA A

La categoría A se identifica cuando el estado de tensiones en el terreno del frente y de alrededor de la excavación no es suficiente para exceder las propiedades resistentes del medio. Cuanto más próxima a la sección teórica está la sección transversal excavada, más próximo a los hastiales del túnel se encontrará el efecto arco.

Los fenómenos de deformación, que se desarrollan en una gama elástica, aparecen inmediatamente y se miden en centímetros.

El frente completo es estable. La inestabilidad local aparece, únicamente, en forma de caída de bloques aislados provocadas por configuraciones desfavorables del macizo rocoso. En este contexto, los estados anisótropos de tensión-deformación en el terreno juegan un papel fundamental.

La estabilidad de un túnel no se ve afectada por la presencia de agua, incluso en condiciones hidrodinámicas, a menos que las propiedades resistentes del terreno se vean mecánicamente o químicamente afectadas por el agua o a menos que el gradiente hidrodinámico sea tan intenso que el lavado producido destruya la resistencia al corte a lo largo de superficies de deslizamiento.

Las técnicas de estabilización son empleadas principalmente para evitar el deterioro de la roca y para mantener la sección de la excavación.

CATEGORÍA B

La Categoría B se identifica cuando el estado de tensiones en el terreno del frente y alrededor de la cavidad durante la excavación es suficiente para exceder la resistencia del terreno en la gama elástica.

El efecto arco no se forma inmediatamente alrededor de la excavación, sino a una distancia de ella, que depende del tamaño de la corona de terreno sujeto a plastificación.

La deformación que aparece a ritmos de avance normales, que se encuentra en la gama elasto-plástica es diferenciada y es medible en centímetros.

A ritmos de avance normales, el túnel es estable a corto plazo y la estabilidad mejora o empeora según crecen o decrecen las velocidades de avance. La deformación de la zona de avance en forma de extrusión no afecta a la estabilidad del túnel, ya que el terreno continúa siendo capaz de mantener suficiente resistencia residual.

La inestabilidad, manifestada en forma de material suelto que se desploma súbitamente, se extiende en el frente y en la cavidad, pero deja suficiente tiempo para emplear medidas radiales de confinamiento tradicionales después del paso del frente.

En algunos casos, puede ser necesario recurrir al preconfinamiento del frente equilibrando las medidas de estabilización entre el frente y la cavidad para mantener la deformación dentro de límites razonables.

La presencia de agua, especialmente en condiciones hidrodinámicas, reduce la resistencia al corte del terreno, favorece la extensión de la plastificación y, por tanto, incrementa la magnitud de los fenómenos desestabilizadores. Por tanto se debe eliminar el agua, especialmente cerca del frente, canalizándola fuera de la zona de avance.

CATEGORÍA C

La Categoría C se identifica cuando el estado de tensiones del terreno es considerablemente mayor que las propiedades resistentes del material incluso en la zona de alrededor del frente. No se puede formar un efecto arco ni en el frente, ni alrededor de la excavación debido a que el terreno no posee suficiente resistencia residual. La deformación es inaceptable ya que se desarrolla inmediatamente en la gama de rotura, dando lugar a serias manifestaciones de inestabilidad, como el fallo del frente y el colapso de la cavidad, sin dejar

tiempo para las operaciones de confinamiento radial: se deben llevar a cabo las operaciones de mejora del terreno por delante del frente para provocar una acción de preconfinamiento capaz de crear un efecto arco artificial.

Si no se tiene en cuenta, como es debido, la presencia de agua en condiciones hidrostáticas, se favorece la extensión de la plastificación reduciendo más las propiedades resistentes del terreno e incrementándose, sobre todo, la magnitud de la deformación. Bajo condiciones hidrodinámicas, se traduce en transporte de materia y en sifonamiento, que resulta del todo inaceptable. Debe evitarse, por tanto y, especialmente cerca del frente, canalizando el agua para drenar la zona de avance.

Se ha observado durante más de veinte años de diseño y construcción de túneles que todos los casos de obras subterráneas caen dentro de una de estas tres categorías de comportamiento.

6.2. Momentos y fases del sistema A.DE.CO.-RS

El sistema basado en el Análisis de la DEformación COntrolada en Rocas y Suelos sugiere que en el desarrollo lógico del diseño y construcción de un túnel se debe proceder de acuerdo con las etapas que se resumen en la Fig. 27.

MOMENTO	FASE	DESCRIPCIÓN
DISEÑO	— ESTUDIO	— ANÁLISIS DE LOS EQUILIBRIOS NATURALES EXISTENTES
	— DIAGNÓSTICO	— ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN (*) EN AUSENCIA DE MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN
	— TRATAMIENTO	— CONTROL DE LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN (*) EN RELACIÓN CON LOS SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN ESCOGIDOS
CONSTRUCCIÓN	— OPERACIÓN	— APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE ESTABILIZACIÓN PARA CONTROLAR LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN (*)
	— AUSCULTACIÓN	— CONTROL Y MEDICIÓN DE LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN (*) COMO RESPUESTA DEL MACIZO ROCOSO DURANTE EL AVANCE DEL TÚNEL (MEDICIÓN DE LA EXTRUSIÓN EN EL FRENTE Y DE LA CONVERGENCIA EN EL CONTORNO DE LA CAVIDAD Y, A UNA DISTANCIA VARIABLE DEL FRENTE, EN EL SENO DEL MACIZO ROCOSO)
	— AJUSTES DEL DISEÑO FINAL	— INTERPRETACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN (*) — EQUILIBRADO DE LOS SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN ENTRE EL FRENTE Y EL PERÍMETRO DE LA CAVIDAD

(*) FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN EN TÉRMINOS DE LA EXTRUSIÓN EN EL FRENTE Y DE LA CONVERGENCIA A DISTANCIA VARIABLE DE ÉL, EN EL SENO DEL MACIZO ROCOSO

Figura 27.

El *momento o etapa de diseño* se compone de las siguientes fases:

- la *fase de estudio*: durante esta fase, el ingeniero proyectista determina la naturaleza del terreno afectado por el túnel en términos de mecánica de suelos y rocas. Esto es indispensable para un análisis de los equilibrios naturales existentes para el éxito de la posterior fase de diagnóstico;
- la *fase de diagnóstico*: durante esta fase, el ingeniero de diseño se vale de la información recogida durante la fase de estudio para dividir el túnel en tramos de comportamiento uniforme de acuerdo a las categorías A, B o C, como se ha descrito anteriormente, en función del comportamiento de tensión-deformación que se prevé. Se definen los detalles del desarrollo de la deformación y de los tipos de cargas activadas por la excavación;
- la *fase de terapia*: durante esta fase, el ingeniero de diseño decide, en función de las predicciones efectuadas durante la fase de diagnóstico, qué tipo de acción (preconfinamiento o simple confinamiento) acometer, así como los medios necesarios para implementarla para alcanzar la completa estabilización del túnel, naturalmente con referencia a las tres categorías de comportamiento A, B y C. El ingeniero diseña, por tanto, la composición de las secciones tipo longitudinal y transversal y comprueba su eficacia mediante herramientas matemáticas.

La *etapa o momento de construcción* se compone de las siguientes fases:

- la *fase de operación*: durante esta fase se llevan a cabo los trabajos para la estabilización del túnel según las predicciones de diseño. Los diversos medios empleados se adaptan en términos de confinamiento y preconfinamiento de acuerdo a la respuesta de deformación real del macizo rocoso y se comprueban según el programa de control de calidad preparado anteriormente;
- la *fase de monitorización*: durante esta fase se miden los fenómenos de deformación (que constituyen la respuesta del medio frente al avance del túnel) y se interpretan, primero para verificar, durante la construcción, la precisión de las predicciones realizadas durante las fases de diagnóstico y terapia para dar así los últimos retoques al diseño en lo que se refiere a equilibrar las técnicas de estabilización entre el frente y en la cavidad. La fase de monitorización no concluye cuando se completa el túnel, sino que continúa durante toda su vida para la constante revisión de las condiciones de seguridad.

El correcto *diseño* de las obras subterráneas supone entonces conocer, en función de los equilibrios naturales originales existentes, cómo predecir el comportamiento del terreno durante la excavación, en lo que respecta al inicio y desarrollo de los fenómenos de deformación. De este modo se pueden emplear las predicciones para seleccionar los métodos constructivos que mejor se ajusten para mantener estos fenómenos dentro de límites aceptables, así como establecer los tiempos constructivos y procedimientos en función del avance del túnel y de la posición del frente.

La correcta construcción de una obra subterránea, por otro lado, significa trabajar de acuerdo a las decisiones de diseño: en primer lugar, realizar una *atenta lectura* de la respuesta del terreno a la acción de la excavación y a las operaciones de estabilización en términos de extrusión y convergencia del frente y hastiales del túnel en la superficie de la cavidad y en el terreno a cierta distancia de ella; en segundo lugar, una vez se han *interpretado* los resultados de las diversas mediciones, decidir la longitud real, la velocidad y el ritmo de avance, intensidad, localización y tiempos de las operaciones de estabilización, así como el equilibrio de éstas entre el frente y perímetro de la excavación.

6.2.1. Fase de estudio

Realizar una excavación subterránea supone perturbar los equilibrios naturales existentes. Diseñar una excavación de este tipo con una mínima perturbación del medio en el que se trabaja y, por lo tanto, con una respuesta de deformación mínima, significa tener anticipadamente el *conocimiento* más completo posible del *estado natural de equilibrio* del terreno antes de que la excavación dé comienzo.

De esta forma, el diseño y construcción de un túnel debe ir precedido de una fase de estudio durante la que se pueda asegurar la naturaleza del medio, adquiriendo información del terreno afectado por la excavación, de su *litología, estructura, estratigrafía, morfología, tectónica, hidrología, geotecnia, geomecánica y estados de tensiones*, todo ello, indispensable para el ingeniero de diseño, de cara a analizar los equilibrios naturales existentes y para llevar a cabo correctamente la posterior fase de diagnóstico.

La fase de estudio se compone de dos pasos consecutivos.

El *primer paso* supone una primera estimación del perfil geológico del terreno a lo largo del trazado, a partir de mapas geológicos a escala de 1:1.000.000, de literatura existente y de estudios de fotogrametría, todo ello integrado con los estudios en superficie, incluyendo:

- estudios litológicos, con individualización de las unidades principales;
- estudios geomorfológicos, prestando especial atención a la estabilidad de taludes;
- estudios de geología estructural, identificando las líneas principales de discontinuidad;
- estudios hidrogeológicos, identificando el sistema hidrogeológico principal y un estudio de los manantiales. Se deben determinar y monitorizar los caudales de éstos últimos durante la construcción, para establecer el efecto drenante que la cavidad va a tener sobre ellos.

La primera estimación del perfil geológico se acompaña de una serie de hojas litológicas que ofrecen información de los litotipos que afloran a lo largo del trazado, así como de un resumen de los estudios realizados.

Si el primer paso de la fase de estudio tiene como resultado la decisión de construir un túnel piloto, el diseño final puede aprovechar la información geológica y geomecánica obtenida de este túnel [8], [9] así como de los ensayos *in situ* diseñados para evaluar las propiedades resistentes y de deformación del macizo rocoso.

El *segundo paso* se basa en los resultados obtenidos del primero. Consiste en la planificación de los estudios geológicos, incluyendo la definición de los estudios geofísicos indirectos, de los ensayos *in situ* y del estudio de los sondeos con extracción de testigo continuo para la correcta definición de los parámetros geotécnicos y para la recuperación de muestras no alteradas de la zona que atravesará el túnel.

Para obtener muestras no alteradas, es indispensable el uso de equipos diseñados para provocar la menor perturbación posible en el macizo rocoso.

Los testigos obtenidos se usan para estimar las propiedades físico químicas del macizo rocoso y, como éstas se modifican con el paso del tiempo, también para estimar los parámetros geotécnicos y geomecánicos.

Se calcula lo siguiente:

- la curva intrínseca de la matriz de testigos;
- los parámetros de deformación (módulo de elasticidad inicial y módulo de deformación total calculados para niveles de tensión comparables a los que se van a manifestar durante la construcción del túnel).

Cuando sea posible, es importante calcular las propiedades de resistencia y deformación de las discontinuidades estructurales, así como deducir, a partir de un estudio detallado de éstas, las curvas intrínsecas y los parámetros de deformación.

La segunda etapa se completa con una estimación del estado natural de tensiones basada en las dimensiones del recubrimiento y en las estructuras tectónicas afectadas.

Podría ser muy aconsejable, en función del tamaño del túnel a construir y de la complejidad de las estructuras tectónicas afectadas, realizar ensayos para medir, cuando sea posible, el estado natural de tensiones a nivel de la cavidad.

6.2.2. Fase de diagnóstico

Durante la fase de diagnóstico, el proyectista emplea la información recogida durante la fase de estudio para dividir el túnel en tramos de comportamiento de tensión-deformación homogéneos, de acuerdo a las categorías A, B o C (frente estable, frente estable a corto plazo, frente inestable). Para hacer esto el proyectista realiza predicciones de la respuesta de deformación del medio frente a la acción de la excavación, empleando métodos teóricos, prestando particular atención a los fenómenos de deformación que, en ausencia de intervención de estabilización, se manifestaría en el frente y, consecuentemente, en la corona de terreno alrededor de la cavidad.

El análisis de la *respuesta de deformación del sistema frente-zona de avance y de la cavidad* se realiza en términos de origen, localización, desarrollo y dimensiones de los probables fenómenos de deformación. Se recurre a métodos matemáticos, como el de las líneas características, modelos bidimensionales y tridimensionales de elementos finitos, etc., que son capaces, dependiendo de la fiabilidad de los datos geotécnicos y geomecánicos de entrada, de orientar al ingeniero proyectista para decidir cuál de las tres categorías de comportamiento, A, B o C, debe asignarse a un tramo determinado del túnel.

De estos métodos, el de la línea característica [5], que hoy puede emplearse en la mayoría de las situaciones, parece ser especialmente sencillo y fácil de usar para este propósito (Fig. 28).

De los métodos experimentales disponibles para ciertos tipos de terreno, se pueden emplear los ensayos de extrusión de muestras no perturbadas en células triaxiales para simular el avance del túnel en laboratorio bajo diferentes recubrimientos, así como con cambios en el estado de tensiones en el sistema frente-zona de avance inducidos por la acción de la excavación para mostrar cómo se comporta (Fig. 28).

El resultado del análisis, finalmente, se concreta en un perfil longitudinal del túnel mostrando la división en tramos de comportamiento uniforme de tensión-deformación y categoría de comportamiento (A, B, C) asociada a cada tramo.

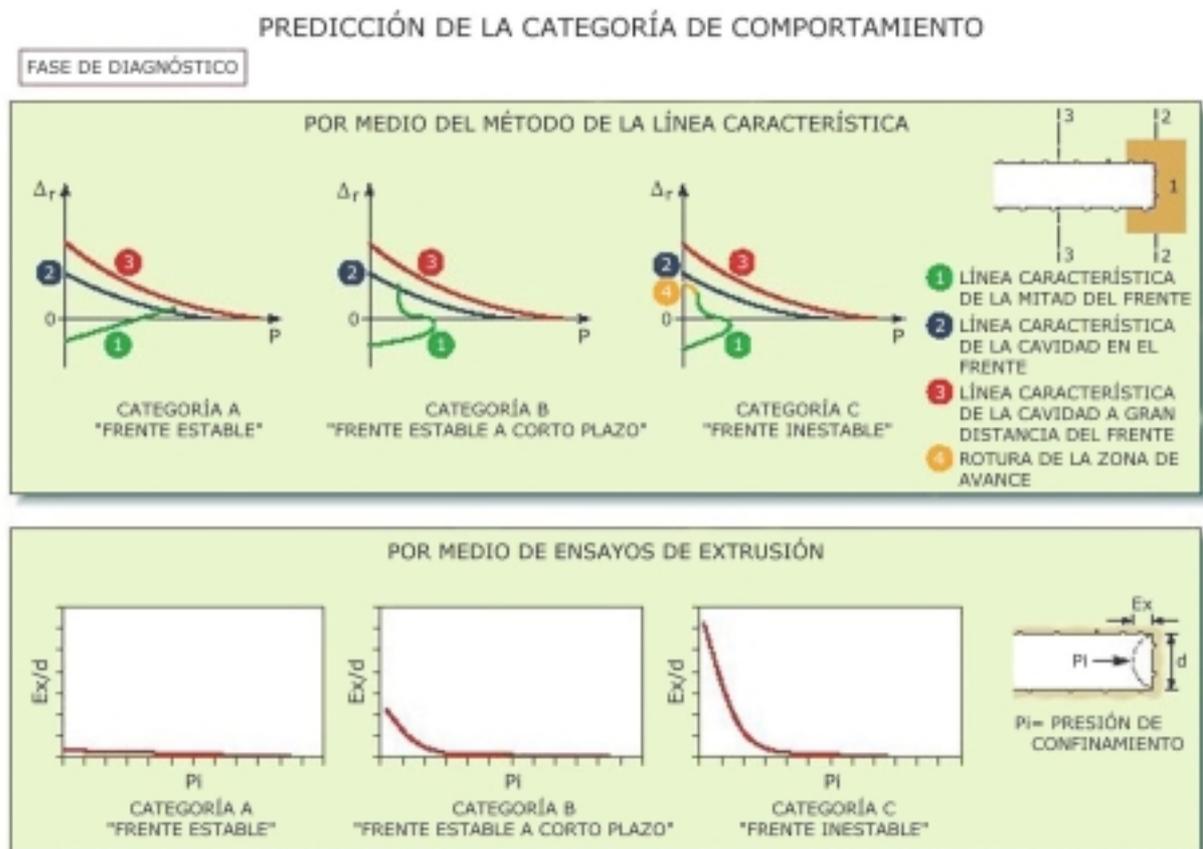


Figura 28. Predicción de la categoría de comportamiento.

Una vez se ha decidido a cuál de las tres categorías de comportamiento corresponde cada tramo, es también parte de la fase de diagnóstico el identificar, dentro de cada categoría, lo siguiente:

- a) los *tipos de deformación* que se desarrollarán alrededor de la cavidad (extrusión, preconvergencia y simple convergencia);
- b) las *manifestaciones de inestabilidad* consecuentes y esperadas, por ejemplo:
 - S desplome de terreno y descostramiento de estratos en el frente causados por la extrusión de la zona de avance y la preconvergencia;
 - S desplome de terreno y descostramiento de estratos alrededor de la cavidad causados por la convergencia de la cavidad;
 - S colapso de la cavidad causada por la rotura del frente.
- c) las *cargas movilizadas por la excavación*, de acuerdo a los modelos de pesos de sobrecarga y de coronas plastificadas.

6.2.3. Fase de tratamiento

Durante la fase de tratamiento, el ingeniero proyectista decide, en función de las categorías de comportamiento asignadas durante la fase de diagnóstico, qué tipo de acción (preconfinamiento, confinamiento o presostenimiento) se va a emplear para alcanzar la completa estabilización del túnel (regulación de los fenómenos de deformación).

De lo que se ha indicado anteriormente referente a la importancia de la rigidez de la zona de avance en lo que respecta al comportamiento tenso-deformacional del frente y de la cavidad y, por lo tanto, a la estabilidad de todo el túnel, se le abren al ingeniero proyectista, básicamente, tres caminos de actuación:

- se puede limitar a una acción de confinamiento simple en el caso de túneles con un comportamiento de tensión-deformación estable (categoría A);
- debe pensar en producir una acción enérgica de confinamiento -además, por supuesto de la acción de confinamiento- en el caso de túneles con un comportamiento de tensión-deformación de frente inestable (categoría C);
- puede escoger entre preconfinamiento o simple confinamiento de la cavidad en función del ritmo de avance que considere que puede alcanzar en el caso de túneles con frente estable a corto plazo (categoría B).

Una vez se ha decidido la acción que se va a llevar a cabo, ésta debe perfeccionarse en términos de sistemas, ritmos, etapas de excavación y, por encima de todo, en métodos de estabilización y en herramientas. Para éstas últimas, se debe establecer cómo y dónde deben emplearse con respecto a la posición del frente y de acuerdo con la categoría de comportamiento, A, B o C implicada, para conseguir la acción deseada.

Para conseguir realmente la acción deseada en la práctica, el ingeniero proyectista tiene una serie de herramientas disponibles con las que implementar todos los tipos necesarios de estabilización.

Teniendo presente que la estabilización puede ser de los siguientes tipos:

- *conservación*, cuando el efecto principal es el de contener la relajación de la tensión principal menor;
- *mejora* cuando la acción principal es la de mejorar la resistencia al corte del medio;

de los instrumentos *que producen una acción de preconfinamiento sobre la cavidad* [1] (Fig. 29) y que tiene disponibles el ingeniero proyectista, los siguientes ejercen un efecto esencialmente de conservación:

- escudos de hormigón proyectado reforzado con fibra creados mediante *precorte mecánico* a lo largo del contorno del túnel empleando el propio precorte como encofrado [3], [10];
- *refuerzo de la zona de avance*, a una distancia no inferior al diámetro del túnel, por medio de tubos de fibra de vidrio o de elementos estructurales fijados al terreno con mortero de cemento; la entidad de esta operación dependerá de cuánto se debe incrementar la resistencia al corte de la zona de avance [3], [10], [11], [12], [13];

- bulonado radial del techo utilizando bulones de *anclaje puntual*, que aplican una presión de confinamiento “activa” sobre las paredes del túnel, que se puede regular mediante la pretensión de los bulones;
- *contrabóveda*, que crea una estructura cerrada de sostenimiento y multiplica la capacidad de los sostenimientos primario y secundario con lo que se consiguen niveles muy elevados de presión de confinamiento alrededor de la cavidad.

Ejercen principalmente una acción de *mejora*:

- una corona de *terreno reforzado* alrededor de la cavidad, creada mediante bulones de anclaje repartido, capaces de incrementar la resistencia al corte del terreno afectado, elevando su curva intrínseca.

Aquellas herramientas que no pueden considerarse dentro de ninguna de estas dos categorías porque no producen ni confinamiento, ni preconfinamiento, se conocen como *métodos de presostenimiento o sostenimiento*, dependiendo de que actúen por delante del frente o no. No tienen influencia sobre la formación del efecto arco y no tienen posibilidad, ni de contener de forma apreciable la relajación de la tensión principal menor, ni de mejorar la resistencia al corte del terreno.

Un ejemplo de estos métodos de presostenimiento es el *tablestacado* que, a pesar de constituir vigas que descansan en cerchas instaladas después de la excavación formando una configuración cilíndrica que recorre el trazado del túnel, es incapaz de producir un efecto arco debido a la ausencia de una respuesta transversal recíproca entre ellas.

6.2.3.1. Composición de las secciones transversales y longitudinales tipo

En los párrafos precedentes se ha visto que la estabilidad del sistema frente-zona de avance juega un papel fundamental en la respuesta de deformación del medio frente a la apertura de una cavidad subterránea y, consecuentemente, a largo y corto plazo, en la estabilidad del propio túnel. Se ha visto que la estabilidad de este sistema se puede describir mediante tres categorías fundamentales de comportamiento que caracterizan el tipo de túnel que se va a excavar, para un tramo determinado siguiendo un esquema conceptual, y que es completamente lógico referirse a estas categorías cuando se están seleccionando los métodos de estabilización que garanticen la estabilidad y la seguridad de los trabajos.

La Fig. 30 muestra esquemáticamente, teniendo en cuenta lo indicado anteriormente, la gama de aplicación de los instrumentos individuales de estabilización que están disponibles para el ingeniero proyectista en el contexto del esquema propuesto. Su combinación determinará las secciones longitudinal y transversal diseñadas para garantizar la viabilidad de las excavaciones y la estabilidad del túnel a largo y a corto plazo. Los casos afectados son los siguientes:

- *en tramos de túnel con frente estable* (Categoría de comportamiento: A, tensiones: en la gama elástica, manifestaciones típicas de inestabilidad: desplome de terreno), los métodos estabilización propuestos tienen, por encima de todo, una función protectora y están determinados por la configuración geoestructural del terreno así como de la presencia de agua;
- *en tramos de túnel con frente estable a corto plazo*, (Categoría de comportamiento: B, tensiones: en la gama elasto-plástica, manifestaciones típicas de inestabilidad: descostramiento de estratos debido a la

Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

extrusión de la zona de avance, preconvergencia y convergencia de la cavidad), los métodos de estabilización deben garantizar la formación de un efecto arco tan próximo al contorno de la excavación como sea posible. Se proponen, por tanto, instrumentos que son capaces de evitar que el terreno pierda sus propiedades resistentes y de deformación, particularmente en lo que respecta al sistema frente-zona de avance. La acción de confinamiento o preconfinamiento es suficiente para contrarrestar el inicio de la plastificación o, al menos, limitar su extensión;

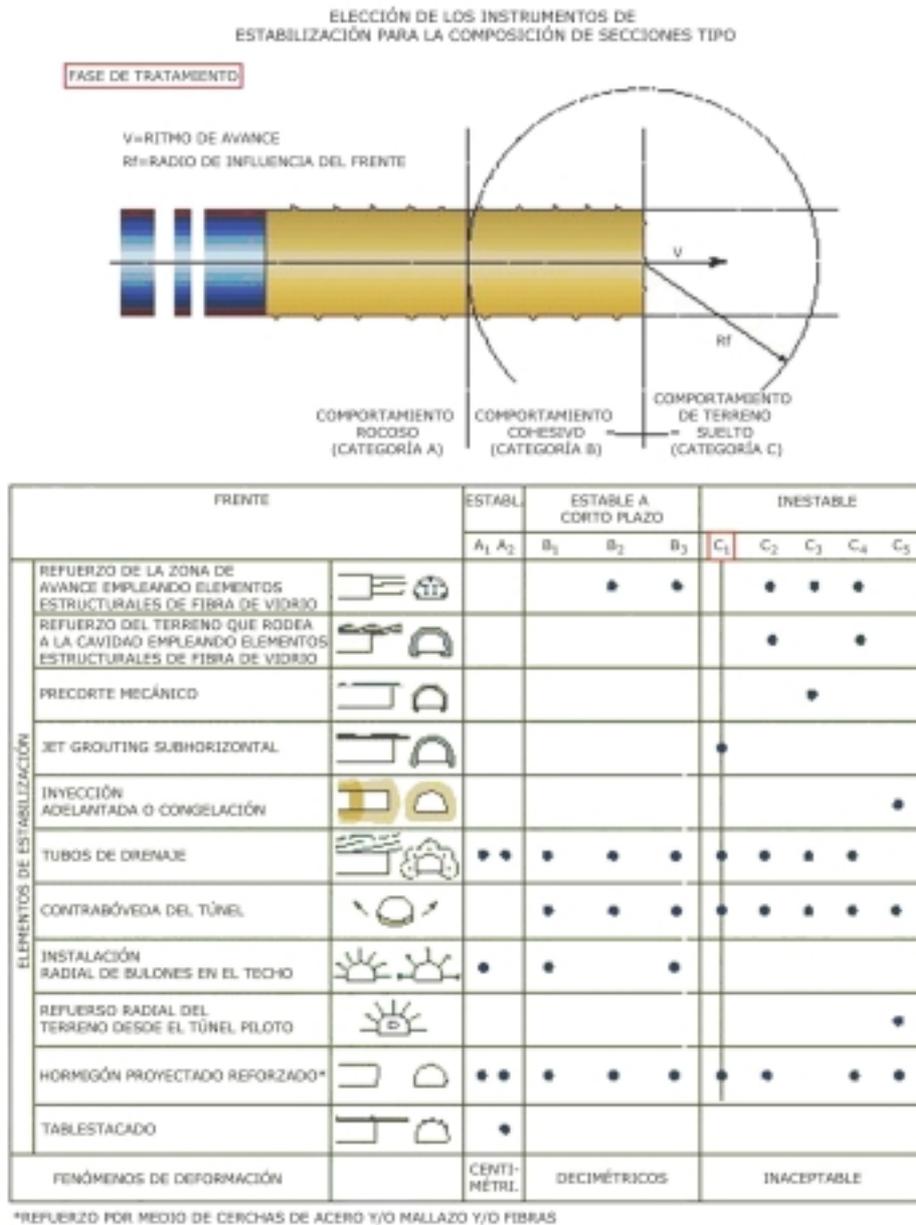


Figura 30. Elección de los medios de estabilización para la comparación de los tipos de sección transversal.

- en tramos de túnel con frente inestable (Categoría de comportamiento: C, tensiones: en la gama de rotura, manifestaciones típicas de inestabilidad: rotura del frente, colapso de la cavidad) los métodos de estabilización deben garantizar la formación de un efecto arco artificial por delante del frente. Los

instrumentos propuestos para el preconfiamiento de la cavidad evitan efectivamente la anulación de la tensión principal menor σ_3 , asegurando la estabilidad del sistema frente-zona de avance, cuando el fenómeno de deformación puede aun controlarse.

El proyectista puede, por tanto, emplear la tabla de la Fig. 30 como referencia para el diseño de secciones longitudinales y transversales tipo.

La Fig. 31 muestra un ejemplo de la composición de las secciones transversal y longitudinal tipo C1.

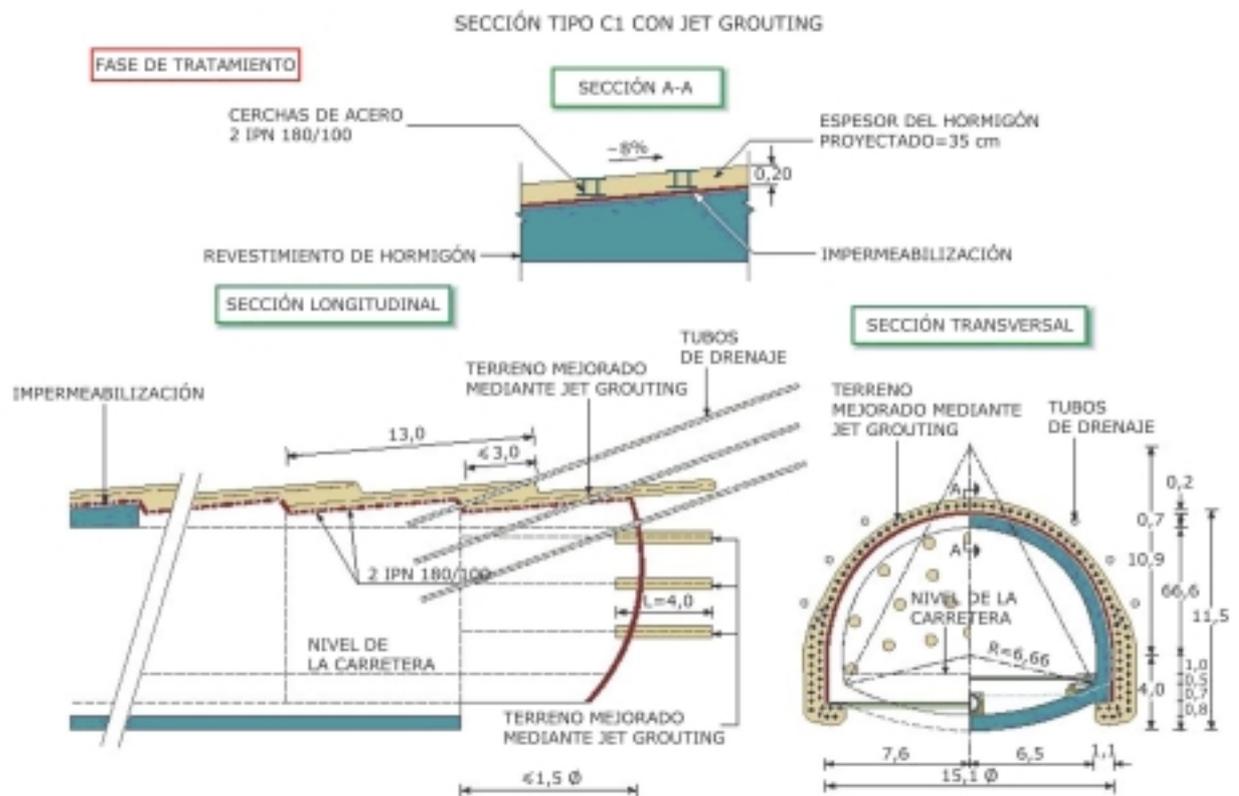


Figura 31. Sección tipo C1 con *jet-grouting*.

6.2.3.2. Diseño y análisis de las secciones transversal y longitudinal tipo. Resumen de la fase de tratamiento

Una vez decidido el tipo de acción que se va a ejercer, diseñados los métodos a emplear para conseguirla y compuestas las secciones longitudinal y transversal, el ingeniero proyectista tiene aún pendiente la tarea de configurar las dimensiones de éstas últimas así como de analizarlas mediante métodos matemáticos ya empleados durante la fase de diagnóstico. El análisis del equilibrio entre la intervención en el frente y en el perímetro de la excavación es de particular importancia, al igual que el estimar sus eficacias en función de lo aceptable que resulte el comportamiento de tensión-deformación previsto para el túnel, una vez

implementadas las medidas de estabilización. Naturalmente, los cálculos se pueden llevar a cabo recurriendo a modelos simples de convergencia-confinamiento o bien a modelos más complejos de extrusión-confinamiento o extrusión-preconfinamiento, en función de la situación específica de tensión-deformación que se asuma.

Además de las secciones tipo principales (o prevalentes) de diseño, se pueden diseñar algunas secciones tipo derivadas para emplearlas en situaciones estadísticamente probables que pueden presentarse en puntos que no se pueden prever a partir de los datos disponibles.

Las secciones tipo prevalentes y derivadas se encuentran, en cualquier caso, inequívocamente definidas en el sentido de que para cada tipo no sólo se describen en detalle la clase, intensidad, etapas y secuencia de las operaciones de construcción sino que, también se identifican claramente las condiciones geológicas y geomecánicas en las que se debe emplear la sección tipo en cuestión.

La introducción de las secciones de diseño derivadas permite en la actualidad construir túneles bajo un régimen de aseguramiento de la calidad, de acuerdo con las normas ISO 9000 [15].

El resultado de este estudio de tratamiento es entonces resumido en un perfil geomecánico del túnel, mostrando las secciones tipo longitudinales y transversales a adoptar para cada tramo de túnel según su comportamiento uniforme de tensión-deformación.

6.2.3.3. Zona de avance bajo el nivel freático

Como es sabido, el agua en condiciones hidrostáticas y, más aún, en condiciones hidrodinámicas, reduce considerablemente las propiedades de resistencia y deformación de un terreno. Se sabe, igualmente, que un túnel que avanza por debajo del nivel freático actúa como un gran conducto de drenaje que avanza, por el cual se filtra agua hacia el frente, afectando antes a la zona de avance. Como ya se ha visto, debido a que la zona de avance juega un papel clave en la determinación de la estabilidad del túnel a corto y largo plazo, es importante evitar que el agua circule por el interior de la zona de avance. Esto se puede conseguir, dependiendo de las condiciones específicas encontradas (alimentación del nivel freático, gradientes, etc.) actuando sistemáticamente para impermeabilizar la zona de avance y las paredes de la cavidad (avance bajo condiciones hidrostáticas) o mediante la intercepción del agua por delante del frente a una distancia equivalente a tres o más veces el diámetro del túnel con tubos especiales de drenaje colocados en forma de paraguas alrededor del túnel a excavar (avance bajo condiciones hidrodinámicas).

En el último caso, para asegurar que el tratamiento por delante del frente no tiene el efecto opuesto al deseado, es extremadamente importante prestar gran atención a la correcta implementación de los tubos de drenaje, que nunca se deben insertar en el terreno desde la superficie del frente; se deben insertar en el terreno, en forma de cono truncado desde las paredes laterales del túnel o, al menos, desde el perímetro del frente, de tal forma que la zona de avance no se vea afectada. Si no se hiciera esto, el agua se vertería en la zona de avance lo que tendría efectos nefastos en su estabilidad y en la de todo el túnel.

De forma similar, por la misma razón, se debe asegurar cuidadosamente que el tratamiento de mejora del terreno que suponga la perforación y posterior inserción de elementos de refuerzo en la zona de avance, se lleva a cabo correctamente. Es importante que los orificios se perforen individualmente y que se rellenen y sellen perfectamente con mortero de cemento, acto seguido. Ésta es la única manera de evitar que los

barrenos perforados se llenen de agua, con sus devastadoras consecuencias para la zona de avance que, una vez encharcada y debilitada, no podría ejercer su acción estabilizadora eficazmente.

6.2.4. Fase de monitorización

Una vez se ha completado el tiempo de diseño, el inicio del trabajo de construcción (momento de construcción) coincide con el de *monitorización o auscultación* para verificar la fiabilidad de las previsiones realizadas durante las fases de diagnóstico y tratamiento en cuanto a comportamiento de tensión-deformación.

Esta monitorización (que adquiere gran importancia, habiéndose basado todo el diseño en estas predicciones) se lleva a cabo midiendo y verificando la “respuesta” real del medio a la acción de la excavación. La respuesta se manifiesta en forma de fenómenos de deformación:

- S en el interior de la cavidad, en el frente y en los hastiales de la excavación;
- S en la superficie a lo largo del trazado del túnel.
- S Para este fin se instalan estaciones de medición apropiadas por delante y por detrás del frente (Fig. 32).

De hecho, cuando se prevé que el avance del túnel se va a realizar en condiciones de frente estable a corto plazo o inestable, resulta especialmente interesante y aconsejable, cuando el recubrimiento del túnel lo permite, para una sección transversal dada, instalar antes de la llegada del frente instrumentos verticales multibase diseñados para medir la deformación radial que precede a la llegada del frente.

Para el sistema frente-zona de avance, se instalan entonces micrómetros longitudinales para medir la extrusión y extensómetros de vástago radiales para la convergencia, tanto en la superficie de la cavidad como a distintas distancias de ella, en el interior del macizo rocoso. Se emplean extensómetros especiales de cinta para verificar la convergencia perimetral por detrás del frente.

Cuanto más sistemática y minuciosa sea la monitorización, mayor fiabilidad y utilidad tendrá la información para el ingeniero proyectista, cuya tarea será más o menos compleja, en función de la magnitudes en las que se desarrollen los fenómenos de deformación.

Si el avance del túnel se realiza en un medio pedregoso o suelto (Categorías A o C respectivamente) donde la deformación prevista es tan ligera que supone causa de preocupación alguna, (casos de terreno rocoso bajo recubrimientos débiles a medios) o tan grandes como para resultar inaceptables y requerir intervenciones de preconfiamiento (terreno no cohesivo bajo cualquier recubrimiento, y terreno rocoso y arcilloso bajo grandes recubrimientos), la importancia de la auscultación es reducida, ya que los fenómenos de deformación se desarrollarán rápidamente y serán de magnitud limitada. Por tanto, la tarea del ingeniero de proyecto es mucho más fácil una vez que se han tomado las decisiones apropiadas para el adecuado control de la situación real.

Por el contrario, el ingeniero de proyecto debe prestar mucha más atención y tratar cuidadosamente el análisis de deformación del sistema frente-zona de avance y de la convergencia de la cavidad, tanto en la superficie de ésta, como a cierta distancia de ella, en el interior del terreno. Sus desarrollos temporal y espacial deben

seguirse cuidadosamente *cuando se realiza el avance en un medio de comportamiento cohesivo (Categoría B)*.

En este caso, los fenómenos de deformación serán lentos, progresivos y diferidos y de magnitud siempre creciente y el ingeniero de diseño podrá, tan sólo, obtener la información necesaria para optimizar la intensidad y la distribución de la intervención entre el frente y la cavidad, por un lado, y calibrar las fases, ritmos y sistemas de excavación por otro, interpretando los resultados de la monitorización.

Consecuentemente, nunca se insistirá lo suficiente en lo importante que resulta la correcta interpretación de los resultados de la monitorización, ya que *el ajuste fino y detallado del diseño* de una excavación en construcción depende de la interpretación correcta de estos resultados.

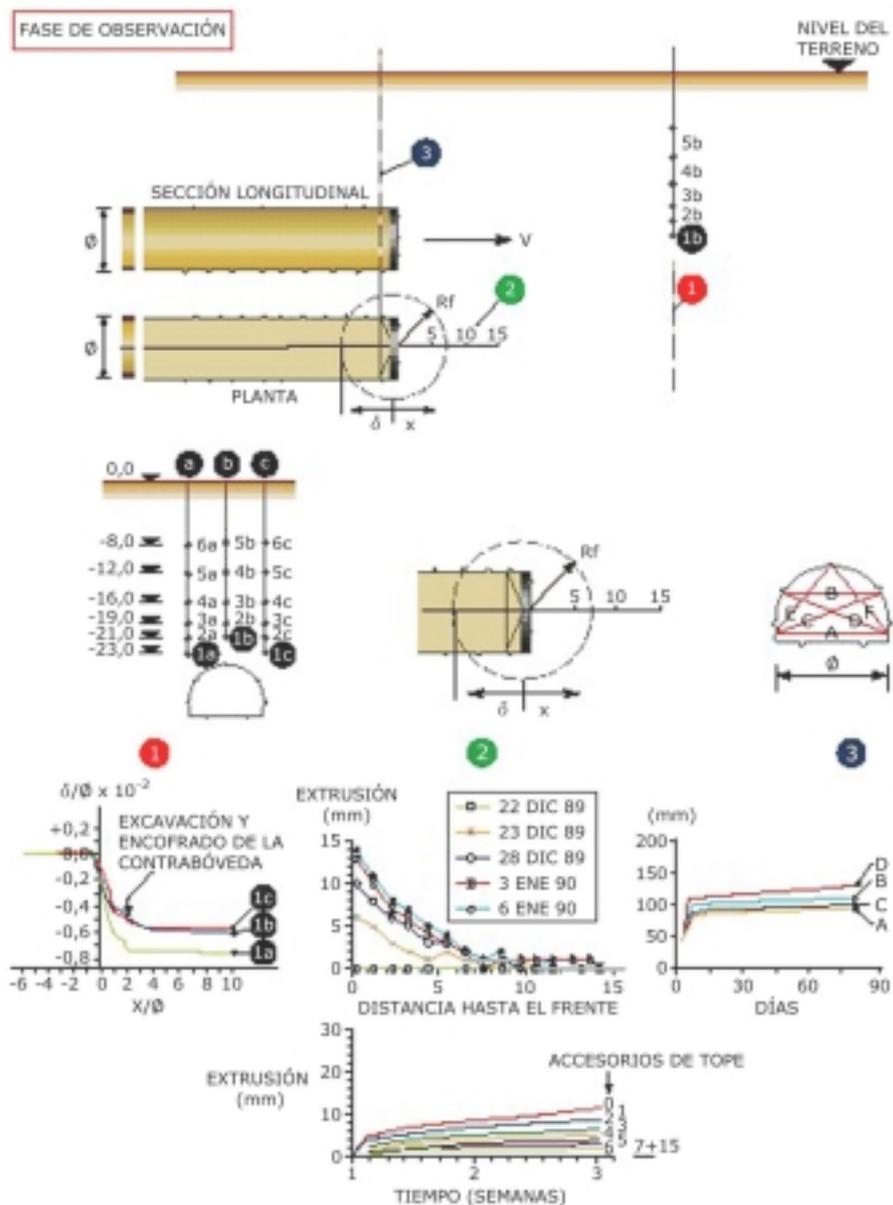


Figura 32. Fase de monitorización.

Durante la construcción, los resultados de la auscultación guiarán al ingeniero responsable del diseño y al jefe de obra en la decisión de proceder con la sección de diseño tipo tal como estaba especificada, o modificar las dimensiones constructivas (de acuerdo con el criterio especificado en el diseño) adoptando un diseño derivado de sección tipo permitido por las especificaciones de diseño para el tramo de túnel considerado, o proceder al diseño de una nueva sección tipo en presencia de condiciones particulares no detectadas en la fase de estudio y, por tanto, no previstas en el diseño.

Es asimismo importante destacar que la fase de monitorización no termina cuando el túnel se ha completado sino que, por el contrario, debe continuar con una auscultación sistemática enfocada a asegurar la seguridad del túnel durante toda su vida de servicio.

7. CONCLUSIONES

Si la deformación que se observa normalmente en el interior de un túnel mientras se está avanzando se interpreta desde el punto de vista de un proceso causa-efecto, parecería perfectamente razonable identificar la causa como la acción que se ejerce en el medio y el efecto como la respuesta de deformación del medio a consecuencia de la acción.

Mientras que, a partir de esta suposición, hasta hace tan sólo unos pocos años no se consideró que valiera la pena prestar atención a la causa, ni efectuar un análisis detallado de la misma, deteniéndose aparentemente en su identificación, el efecto se identificó inmediatamente como convergencia de la cavidad, siendo ésta la estudiada (Fig. 33). Estos estudios dieron lugar a teorías, planteamientos de diseño y sistemas de construcción que suponían que todos los problemas relacionados con la construcción se podían resolver con una simple acción de confinamiento radial (Fig.34).

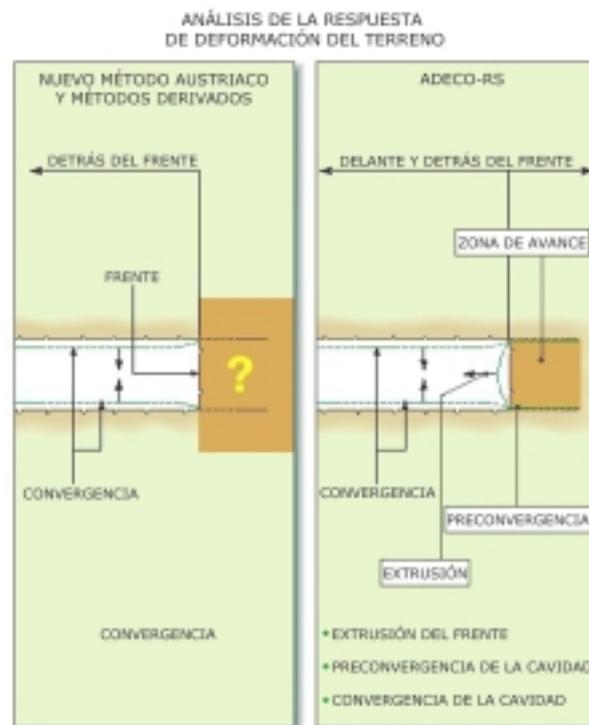


Figura 33. Análisis de la respuesta de deformación del terreno.

Entre los primeros, la “Teoría de las Líneas Características”, desarrollada por Lombardi y el “Método de Convergencia-Confinamiento” desarrollado por Panet [4], [5] son muy conocidos. Aunque reconocieran, por primera vez, el efecto beneficioso de la zona de avance en la estabilidad de la cavidad, nunca proporcionaron ninguna sugerencia eficaz de cómo explotar su efecto, ni de cómo limitar la inestabilidad en el frente.

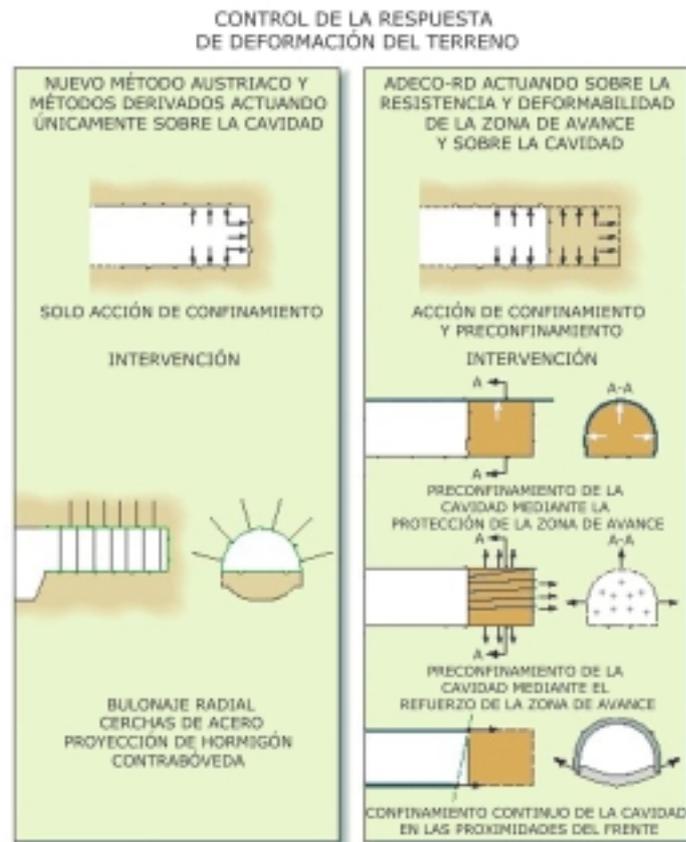


Figura 34. Control de la respuesta de deformación del terreno.

Entre los últimos, planteamientos como el NATM, basado en clasificaciones geomecánicas (frecuentemente usadas con propósitos para los que no fueron creadas), indudablemente constituyen un progreso considerable con respecto al pasado en el momento en que fueron introducidos. Los principales méritos del NATM fueron:

- considerar por primera vez al terreno como material constructivo;
- introducir el uso de nuevas tecnologías de confinamiento activo simple de la cavidad, como el hormigón proyectado y los bulones en el techo;
- subrayar la necesidad de medir e interpretar sistemáticamente la respuesta de deformación del macizo rocoso.

Hoy, sin embargo, habiendo considerado los problemas estáticos de los túneles exclusivamente como problemas bidimensionales concentrando toda la atención en la convergencia de la cavidad aislada, este método (y todos los planteamientos que de él se derivan) muestra las siguientes limitaciones básicas:

- es un sistema de clasificación incompleto y parcial, ya que no es aplicable a todos los tipos de terreno ni a todas las condiciones de tensión-deformación
- pasa completamente por alto la importancia de la zona de avance y la necesidad de emplearla como instrumento de estabilización bajo condiciones difíciles de tensión-deformación;
- ignora nuevas tecnologías, proponiendo todavía, exclusivamente, técnicas de confinamiento simple para la estabilización de un túnel;
- no proporciona una distinción clara entre el momento de diseño y el momento de construcción de un túnel;
- resuelve el problema de la auscultación, de la adecuación y de las correctas dimensiones de las soluciones de diseño adoptadas de una forma indiscutiblemente no científica, comparando bastante alegremente las clases geomecánicas con la magnitud de la respuesta de deformación del terreno.

La errónea convicción de que el efecto siguiente a la acción que se ejerce sobre el medio durante la excavación del túnel es identificable únicamente con la convergencia de la cavidad ha llevado a generaciones enteras de ingenieros por un camino erróneo. Esto se aprendió de planteamientos de diseño y construcción de moda en aquel momento (el NATM y otros métodos derivados que siguen actuando hoy en día de acuerdo con esta errónea convicción) y les indujo a concentrarse en tratar los efectos (conteniendo la convergencia de la cavidad mediante acciones de confinamiento simple) en vez de en las causas de la inestabilidad del túnel [16], [17].

Esta forma de abordar el problema tuvo éxito para perforar túneles bajo condiciones tenso-deformacionales de mediana dificultad, pero mostró sus limitaciones al enfrentarse a condiciones muy difíciles o extremadamente difíciles, debido a:

1. la imposibilidad de efectuar predicciones fiables del comportamiento del túnel durante el avance y, por lo tanto, a la ausencia de una fase de diagnóstico en el proceso de diseño;
2. la adopción improvisada de medidas para limitar una deformación que no se previó de antemano;
3. la ausencia de sistemas de estabilización eficaces, capaces de tratar la causa de la inestabilidad (deformación de la zona de avance) y no, únicamente, el efecto (convergencia);
4. la imposibilidad de hacer estimaciones preliminares de un proyecto en lo que a previsión de riesgos, planificación y ritmos de avance se refiere.

Dada esta situación, la creciente demanda de túneles de todo tipo, incluyendo aquéllos en condiciones de tensión-deformación extremadamente difíciles, requerían la formulación de teorías y procesos capaces de controlar la respuesta de deformación del medio *bajo todas las condiciones de tensión-deformación posibles y no, únicamente, bajo condiciones "no difíciles"*.

Para salir de esta situación de estancamiento, fue necesario traer el problema de vuelta a la realidad y tratarlo como lo que realmente es, *un problema tridimensional*, y considerar la dinámica global del proceso de avance del túnel y no sólo la última fase del proceso.

Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

Fue con esta filosofía con la que comenzaron los estudios experimentales de investigación, que proporcionaron los cimientos de un nuevo plantamiento basado en el Análisis de la Deformación Controlada en Rocas y Suelos. Ha sido empleado con éxito durante los últimos quince años en una gama extremadamente amplia de tipos de terreno y condiciones de tensión-deformación, incluyendo las más difíciles. Asimismo, se ha empleado para la resolución de problemas en numerosas situaciones extremadamente difíciles (véase la Tabla 1, al final) en las que la aplicación de viejos conceptos (NATM y métodos derivados), que no muestran sus limitaciones o defectos intrínsecos en situaciones menos difíciles, habían proporcionado resultados desalentadores e, incluso, catastróficos.

A este respecto, quizás es importante considerar, en conclusión, los sucesos acontecidos en Francia durante la construcción del túnel de ferrocarril de Tartaiguille para el nuevo "TGV del Mediterráneo" para el enlace de alta velocidad Marsella-Lión.

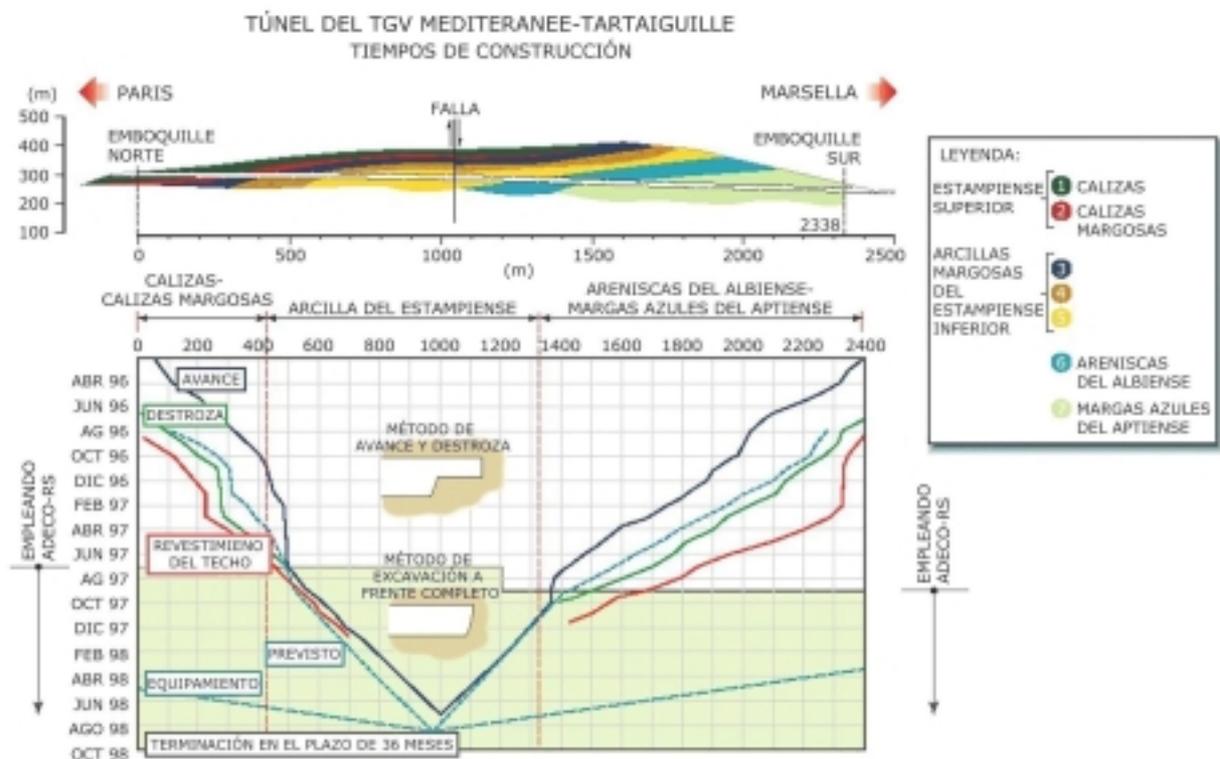


Figura 35. TGV del Mediterráneo.

El avance del túnel, de 180 m² de sección, comenzó en febrero de 1996 y prosiguió con mayor o menor éxito de acuerdo a los principios del NATM hasta septiembre del mismo año, al encontrar la formación *argile du Stampien*, fuertemente expansiva, que causó unas dificultades tales que continuar los trabajos era prácticamente imposible. Para resolver el problema, la SNCF (*Société Nationale du Chemin de Fer*) organizó a principios de 1997 un grupo de estudio ("Comité de Pilotage") compuesto por ingenieros de Ferrocarriles Franceses, del consorcio *G.I.E. Tartaiguille*, los ingenieros consultores *Coyne et Bellier* y *CETU*, ingenieros consultores geotécnicos del consorcio *Terrasol* y *Simecsol*. Estos consultores, a su vez, consultaron a los mayores expertos europeos en túneles, invitándoles a proponer una solución de diseño para cruzar la formación arcillosa de una forma segura y planificada.

Tras examinar numerosas propuestas, ninguna de las cuales ofrecía las garantías de seguridad y fiabilidad exigidas por el cliente, sobre todo, las referentes a período de ejecución, el SNCF se fijó en una propuesta realizada por mí, que contenía los tiempos y costes hipotéticos de construcción garantizados por otros casos similares resueltos con éxito. En marzo de 1997, se le adjudicó a *Rocksoil S.p.A.* el diseño de los 860 m de túnel aún por construir.

El avance se retomó en julio de 1997, tras una revisión radical del diseño, de acuerdo con las ideas del A.DE.CO.-RS (avance a sección completa, véase la Foto 4), y pudo finalmente continuar sin interrupciones y con éxito creciente según los operarios de obra ganaban confianza en el uso de las nuevas tecnologías. Excepcionalmente se registraron ritmos medios de avance constantes (Fig. 35) que, como habían garantizado los ingenieros consultores fueron superiores a 1,4 m diarios, haciendo posible que el túnel estuviera terminado en julio de 1998, después de únicamente un año desde que la obra continuara con el nuevo sistema y un mes antes del plazo previsto [18], [19], [20].



Foto 4. Túnel de Tartaguille (Francia, TGV del Mediterráneo, Marsella-Li3n, terreno: arcillas expansivas (75 % montmorillonita), recubrimiento: 100 m, diámetro del tunel: 15 m). Vista del frente (180 m²) reforzado con elementos estructurales de fibra de vidrio.

A la luz de la considerable experiencia adquirida durante los últimos diez años, [3], [12], [13], [20], [21], se puede decir con confianza que el sistema A.DE.CO.-RS para el diseo y construcci3n de t3neles se puede emplear para conseguir ritmos de avance virtualmente lineales, independientemente de la naturaleza del terreno excavado y de las condiciones de tensi3n-deformaci3n. Mientras que se pudo hablar de mecanizaci3n en una 3nica ocasi3n, bajo condiciones que se pudieron tratar con el confinamiento simple de la cavidad o del frente (escudos, TBMs), hoy se puede hablar de mecanizaci3n en condiciones incluso m3s complejas y difciles que requieren una acci3n de preconfinamiento. La excavaci3n del t3nel se puede industrializar (ritmos y costes de avance constantes, previsi3n precisa de plazos y costes) independientemente del tipo de terreno y las dimensiones del recubrimiento existente.

En resumen, haciendo uso del conocimiento más moderno, la potencia de cálculo y las tecnologías de avance (Fig. 36), el sistema A.DE.CO.-RS ofrece a los ingenieros de construcción y diseño una guía simple con la que se pueden clasificar los túneles en una de las tres categorías fundamentales de comportamiento. Para hacer esto, se hace referencia a la estabilidad del sistema frente-zona de avance que se predice por medio de un análisis en profundidad de tensión-deformación realizado teóricamente empleando herramientas matemáticas. Para cada tramo de túnel con un comportamiento uniforme de deformación identificado de esta manera, el ingeniero de diseño decide el tipo de acción (preconfinamiento o simple confinamiento) a ejercer para controlar la deformación y, en consecuencia, selecciona el tipo de técnica de estabilización y las secciones tipo longitudinal y transversal más apropiadas para cada situación particular, mediante el uso de los instrumentos adecuados para desarrollar las acciones necesarias. Los tipos de sección adecuados para todos los tipos de terreno y condiciones de tensión-deformación se encuentran disponibles. Los costes y tiempos de construcción (por metro lineal) se pueden calcular automáticamente para cada uno de ellos.

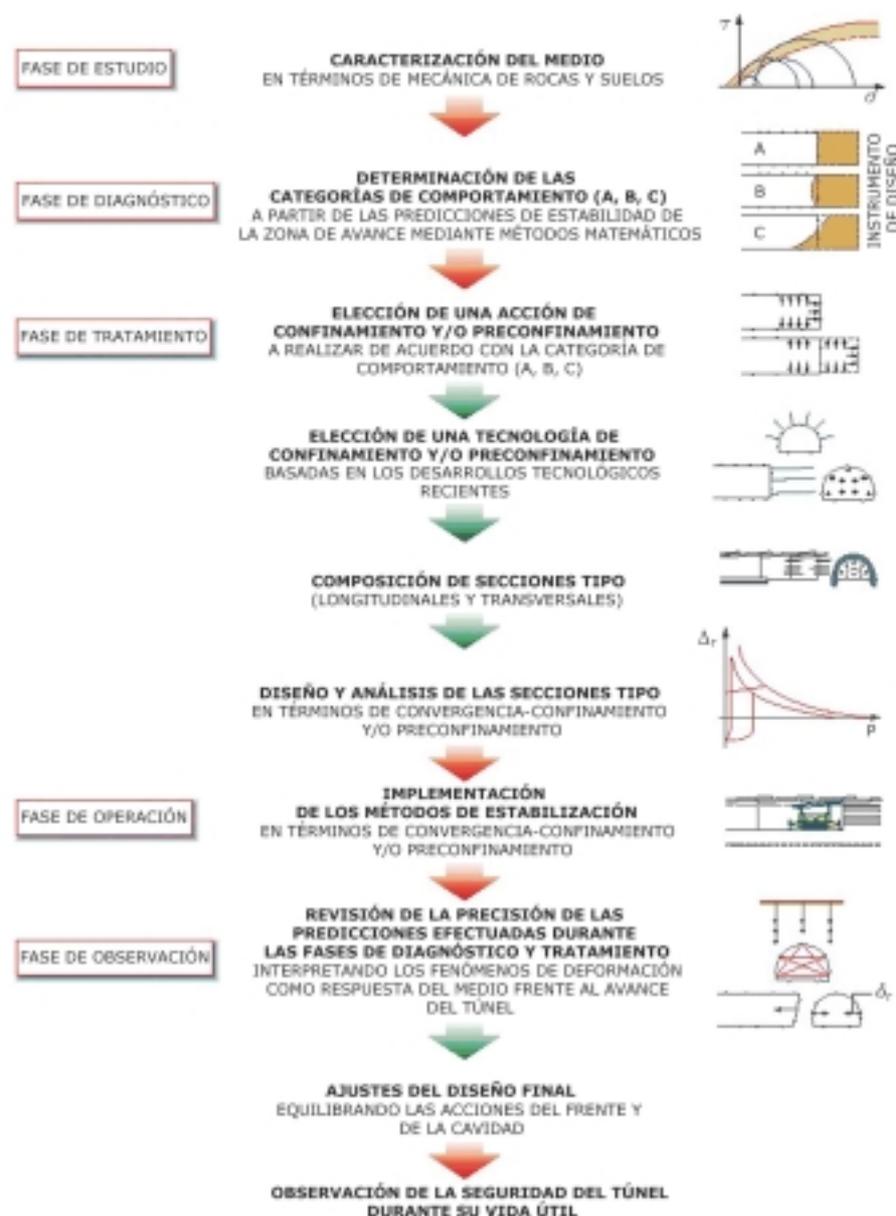


Figura 36.

Empleando este planteamiento:

- se le da importancia a las técnicas de estabilización como instrumentos indispensables para controlar y regular la deformación y como “elementos estructurales”, con el propósito final de la estabilidad del túnel (los túneles se entienden y pagan en proporción a cuánto se deforman). A este respecto, merece la pena tener en cuenta que desde el punto de vista del coste de la declaración de ingresos para proyectos subterráneos, los trabajos de estabilización y mejora del terreno son las únicas tareas que varían significativamente si se comparan con las de excavación y sostenimiento que cada vez tienden más a mantenerse constantes para todos los tipos de terreno (Fig. 37);
- con un diseño completo y fiable, se induce al contratista principal a industrializar las operaciones de avance en todos los tipos de terreno, incluso en los más difíciles;
- ofreciendo la posibilidad de planificar los plazos y costes de construcción, se evitan las disputas que hasta muy recientemente han surgido entre la propiedad y los contratistas;

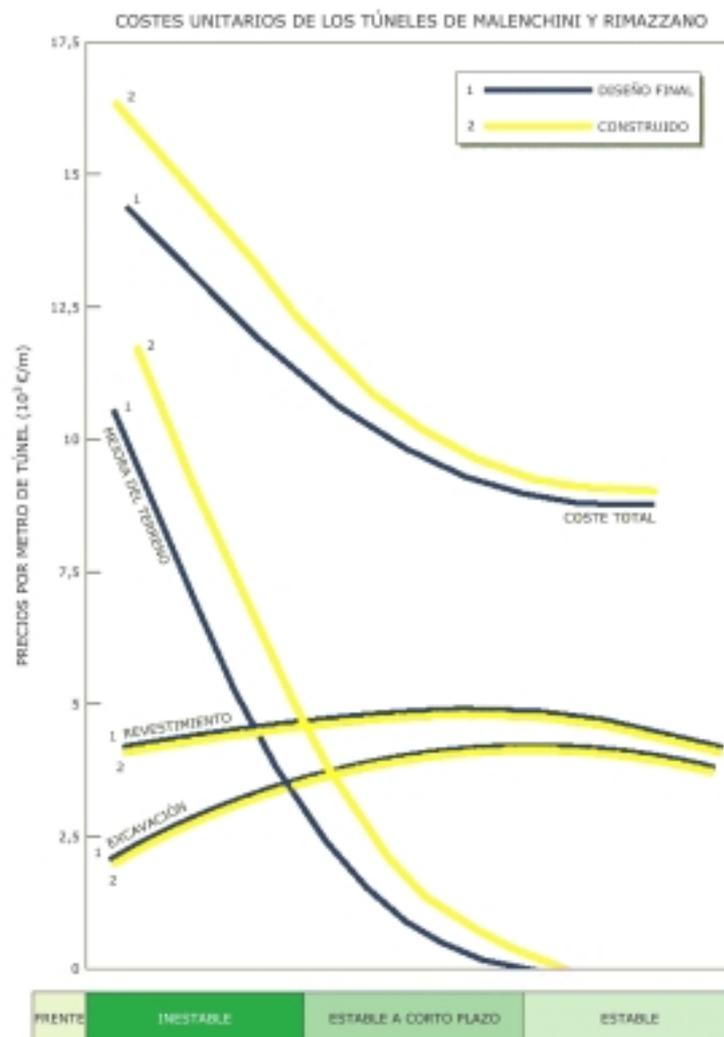


Figura 37. Costes unitarios para los túneles de Malenchini y Rimazzano.

Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

- empleando un único parámetro de referencia, común a todos los tipos de terreno (el comportamiento de tensión-deformación del sistema frente-zona de avance), que puede medirse fácil y objetivamente durante el avance del túnel, se resuelve el problema del más claro y evidente defecto de los sistemas de clasificación anteriores (la comparación de clases geomecánicas con la respuesta de deformación del terreno), que se ha visto alimentado hasta hoy por las disputas entre la propiedad y los contratistas;

Como resultado de estas importantes características, el sistema A.DE.CO.-RS ha suscitado un considerable interés y se ha establecido como una ventajosa alternativa frente a los planteamientos empleados hasta la fecha. A este respecto, la decisión de emplearlo para establecer las especificaciones de diseño en función de las cuales se fueran a producir las adjudicaciones a los contratistas y posteriormente el diseño constructivo de la nueva línea de ferrocarril de alta velocidad Bolonia-Florenia fue particularmente significativa. En este momento, desde luego, constituye el mayor proyecto de construcción de un túnel en el mundo: aproximadamente 84,5 km de túnel con una sección de 140 m² en un trazado total de 90 km a través de terreno realmente difícil debido a su variabilidad y propiedades geomecánicas frecuentemente muy pobres. A pesar de la dificultad de las condiciones, se adjudicaron los contratos en la modalidad "llave en mano" en la que el contratista, evidentemente, pensó que el diseño era suficientemente completo y fiable como para aceptar todos los riesgos, incluyendo los riesgos geológicos. En el presente, se ha completado más del 30 % de las obras, que dieron comienzo en julio de 1998, realizándose el avance a sección completa (véase la Foto 5) en 32 frentes a un ritmo de avance medio de 160 m/mes de túnel terminado [21],[22].

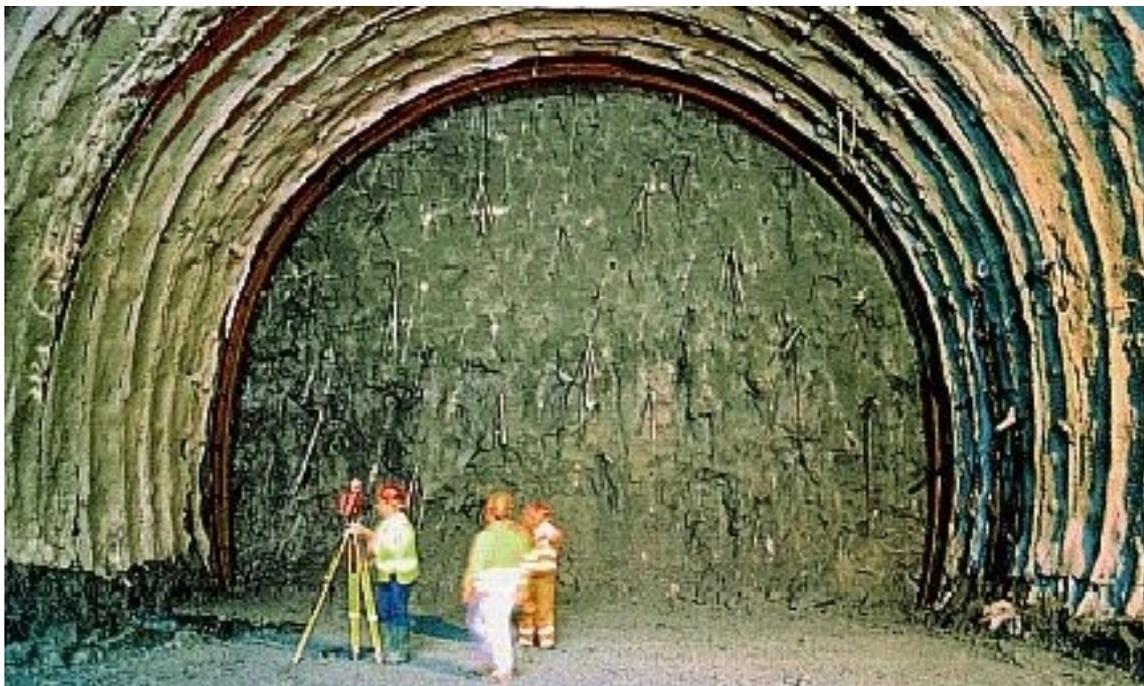


Foto 5. Túnel Pianoro (Italia, línea de ferrocarril de alta velocidad Bolonia-Florenia, terreno: arena limosa cementada, recubrimiento: 150 m, diámetro del túnel: 13,30 m). Vista del frente reforzado con elementos estructurales de fibra de vidrio.

Mientras que el arte del diseño y construcción de túneles quizás ha perdido parte de fascinación con la necesidad de planificación, con la introducción del sistema A.DE.CO.-RS ciertamente ha mejorado en eficiencia y funcionalidad, sin restringir ni condicionar la imaginación.

TABLA 1. La aplicación de los criterios de diseño y construcción enunciados en el sistema ADECO-RS nos permitió alcanzar éxitos considerables, incluyendo la recuperación de túneles cuya excavación por otros medios demostró ser imposible. Algunos de los túneles mencionados anteriormente se enumeran a continuación.

TÚNEL	AÑO	DIÁMETRO (m)	TERRENO	RECUBRIMIENTO máx (m)	RITMOS DE AVANCE (m/día) promedio ÷ máx
"Tasso" (enlace ferroviario Florencia-Arezzo)	1988	12,20	Limos arenosos	50	2,0 ÷ 3,2
"Targia" (enlace ferroviario Bicoca- Siracusa)	1989	12,00	Hialoclastitas	50	2,0 ÷ 3,3
"San Vitale" (enlace ferroviario Caserta-Foggia)	1991	12,50	Arcillas escamosas	100	1,6 ÷ 2,4
"Vasto" (enlace ferroviario Ancona-Bari)	1993	12,20	Arenas limosas y limos arcillosos	135	1,6 ÷ 2,6
"Tartaiguille" (enlace ferroviario Marsella-LiÓN TGV Mediterráneo)	1996	15	Arcillas expansivas	110	2,0 ÷ 1,9
"Appia Antica" (autopista de circunvalación exterior de Roma)	1999	20,65	Piroclastitas arenosas y gravosas	18	2,0 ÷ 3,3

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] LUNARDI, P. (1991): "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", International Conference on Rock and Soil Improvement in Underground Works" -Milan, 18th - 20th March.
- [2] LUNARDI, P. (1996): "Avanza la galleria meccanica". - Le Strade, May.
- [3] LUNARDI, A.; BINDI, R. y FOCARACCI, A. (1989): "Nouvelles orientation pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles". Études et expériences sur le preconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Paris, 7-10 fevrier.
- [4] PANET, M. (1995): "Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement". Ponts et Chaussées.
- [5] LOMBARDI, G.; AMBERG, W.A. (1974): "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine". Congresso Internazionale ISRM, Denver.
- [6] LUNARDI, P. (1997): "The influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation". Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, no. 52.

- [7] LUNARDI, P.: "Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols - First part: Présoutènement et préconfinement". Artículo en tres partes: Quarry and Construction, March 1994, March 1995, April 1996 o Revue Francaise de Geotechnique, no.80, 1997, no.84, 1998, no. 86.
- [8] LUNARDI, P. (1986): "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota". Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce - Turin, 25 th - 26 th November.
- [9] CAMPANA, M.; LUNARDI, P. y PAPINI, M. (1993): "Dealing with unexpected geological conditions in underground construction: the pilot tunnel technique". Acts of 6 th European Forum on "Cost Engineering" Università Bocconi, Milan, 13 th - 14 th May, Vol. 1.
- [10] LUNARDI, P. et al. (1990): "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories". Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - London, 10 th - 12 th July.
- [11] LUNARDI, P. et al. (1992): "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", International Congress on "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16 - 20 Maggio.
- [12] LUNARDI, P. (1993): "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE: Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" Bologna, 22 Ottobre.
- [13] LUNARDI, P. (1993): "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement". Symposium international "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 Novembre.
- [14] LUNARDI, P. (1993): "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles". Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Septembre.
- [15] LUNARDI, P. y FOCARACCI, A. (1998): "Quality Assurance in the Design and Construction of Underground Works, International Congress on Underground Construction in Modern Infrastructure". Stockholm, 7 th - 9th June.
- [16] KOVARI, K. (1994): "On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM", Tunnel, no. 1, o Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 46, 1995.
- [17] LUNARDI, P. (1998): "Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement, Colloque Mécanique et Géotechnique". Laboratoire de Mécanique des Solides - École Polytechnique, Paris 19 mai.
- [18] ANDRE, D.; DARDARD, B.; BOUVARD, A. y CARMES, J. (1999): "La traversée des argiles du tunnel de Tartaiguille", Tunnels et Ouvrages Souterrains, no. 153, May-June.
- [19] LUNARDI, P. (1999): "The Tartaiguille tunnel, or the use of the A.DE.CO. -RS". approach in the construction of an impossible tunnel, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, no. 58, August.
- [20] MARTEL, J.; ROUJON, M. y MICHEL, D. (1999): "TGV Méditerranée - Tunnel de Tartaiguille: méthode pleine section". Proceedings of the International Conference on Underground works: ambitions and realities". Paris, 25 th - 28 th October.

- [21] LUNARDI, P. (1998).: “The Bologna to Florence high speed rail connection. Design and construction aspects of the underground works”. Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo, no. 54. Florence to Bologna at high speed”, Tunnels and Tunnelling International, April 1999.

(Capítulo traducido por Juan Luis Fariñas de Alba, Ing. de Minas de la U.D. de Proyectos de la E.T.S. de Ing. de Minas de Madrid. Original publicado en Tunnels & Tunneling International).