



Estación NATION: longitud 225 m.

## nuevas técnicas de construcción del metropolitano de París FRANCIA

G. VIÉ, ingeniero de minas

### sinopsis

573-4

Los problemas de desplazamiento y transporte de los habitantes de París son tan acuciantes que una nueva empresa se ha lanzado a ampliar la red metropolitana. El progreso de la técnica ha permitido que la construcción de túneles y estaciones se resuelva en condiciones que hubieran sido inabordables cuando se construyó la red inicial. En el artículo se describen las necesidades a resolver y las soluciones adoptadas.

En las grandes aglomeraciones urbanas han de desarrollarse medios de transporte de masas. Teniendo en cuenta la congestión que hay en la superficie, la mejor solución se concibe recurriendo a la circulación subterránea. Ninguna ciudad del mundo puede escapar a esta regla. Al elaborar los proyectos, es preciso tener amplitud de miras y visión futura, ya que las inversiones son importantes y las realizaciones deberán durar mucho tiempo, sin peligro de quedar anticuadas o desbordadas por los acontecimientos.

En los últimos años, el Metropolitano de París ha venido transportando 4 millones de viajeros al día en 3.550 coches que, en las horas-punta, formaban más de 550 trenes que se sucedían cada 2 minutos a lo largo de 233 km de red.

Ahora bien, está previsto que la región parisina tendrá 14 millones de habitantes el año 2000. Entre 1963 y 1967 el tráfico ha aumentado en un 11 %, llegando a hacerse intolerable la sobrecarga en las horas-punta. El aumento del número de vagones por tren y de la longitud de los andenes de las estaciones ha permitido mejorar las condiciones de explotación de algunas de las líneas más concurridas. De esta forma, la capacidad de transporte se ha incrementado en un 20 % en 5 años, pero las mejoras sólo son temporales y no representan más que paliativos momentáneos.

Se tiende a encaminar la conducción de los trenes hacia el campo de la automatización, regulándola desde un puesto central de mando y expedición que acopla la circulación en cada línea. Sin embargo, la experiencia indica que el trazado de la red debe ser modificado y prolongado en distintos puntos hacia los suburbios.

No pareciendo razonable el ensanchamiento del Metro, se tomó la decisión de construir nuevos túneles. Esto es lo que se ha venido realizando desde hace varios años bajo el nombre de «Reseau Express Regional», cuya primera línea, de 46 km de longitud, incluye 20 km en subterráneo de gran sección, a 30 m de profundidad.

Se han ejecutado dos tramos de esta línea por separado: uno al oeste de Auber (Plaza de la Opera) y otro al este de la Nation. El 14 de diciembre de 1969 entró en servicio la parte este (Nation-Boissy-Saint Léger). El 22 de febrero de 1970 comenzó a explotarse la sección Défense-Etoile. En este año, 1972, funcionará el tramo Etoile-Auber, y un año después el tráfico se extenderá desde Auber hasta Saint-Germain en Laye.

La particularidad de la R.E.R. consiste en añadir tramos de red en los arrabales de París, de modo que se simplifiquen los viajes al suprimir los transbordos.

Las dificultades halladas, debidas al elevado número de galerías del subsuelo de París y a la naturaleza variable e inestable de las capas geológicas atravesadas, han sido considerables. La estación de Auber ha sido, sin lugar a dudas, el punto de la obra que ha presentado mayores dificultades: dado que la calle es relativamente estrecha, de mucho tráfico, y el ramal de la R.E.R. debía pasar bajo una línea de Metro en servicio, y todo ello en un medio totalmente acuífero. Era indispensable, además, realizar la excavación sin provocar hundimientos del terreno para evitar cualquier perjuicio en las obras ya existentes.

La amplitud de las obras y la complejidad de las condiciones en que se han efectuado explican la importancia que han tenido los trabajos de consolidación de los terrenos, imprescindibles para la ejecución de los tramos subterráneos.

De acuerdo con los nuevos procedimientos de ingeniería civil, se ha elegido el tratamiento por inyección siempre que, al realizar el gran túnel de la R.E.R., la naturaleza de las formaciones atravesadas exigía que fueran consolidadas. Este tratamiento consiste en introducir en los malos terrenos, previamente a la ejecución de los trabajos, unas lechadas que provocarán su consolidación. La naturaleza de aquéllas depende, por un lado, de la permeabilidad de los terrenos y, por otro, de su naturaleza (margas, aluviones o arenas). En margas y calizas, generalmente, es suficiente una lechada a base de arcilla y cemento, mientras que para los aluviones dan mejores resultados las inyecciones de silicatos de sodio. Por último, la estabilización de arenas muy finas se obtiene sobre todo inyectando resinas fenólicas.

La técnica de las inyecciones de consolidación es bien conocida: se perfora un agujero con un martillo perforador o una sonda y se introduce un tubo perforado recubierto por una manga de caucho. Este tubo queda fijado al terreno por una lechada de arcilla-cemento. Entonces se introduce en él un doble obturador unido al inyector, que hace posible la inyección de las lechadas al nivel deseado, lográndose una difusión más homogénea (fig. 1).



Inyección de consolidación por tubo con manguito: Bajo el efecto de la lechada inyectada, el manguito de caucho se hincha ligeramente dejando paso a la lechada que se reparte en el terreno a tratar.

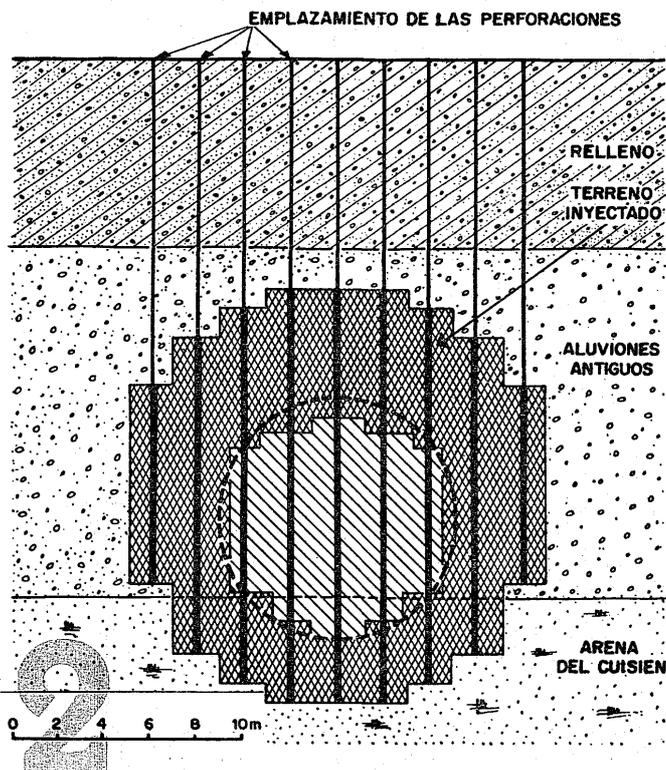
La solución de silicato de sodio, más o menos diluida, lleva incorporado un reactivo orgánico que transforma el silicato en un gel estable. Esta solución silicatada, siempre muy fluida, impregna perfectamente los terrenos penetrando en todos sus espacios libres. En cuanto se forma el gel, esta solución se solidifica colmatando los huecos y formando una red que confiere gran resistencia al terreno, pudiéndose realizar la excavación del túnel sin peligro de hundimiento.

Entre Rond-Point de La Défense y Neuilly la galería atraviesa, a unos 20 m de profundidad, los aluviones del Sena, y los trabajos de excavación han progresado al abrigo de un escudo de 10 m de diámetro externo y 7 m de longitud.

Hay que hacer una aclaración a este respecto. El gálibo de la R.E.R. ha sido calculado para poder empalmar con los vehículos que circulan por las líneas de la S.N.C.F. La utilización de semejante material ha supuesto la construcción de obras de dimensiones muy superiores a las que corresponden al Metropolitano actual. Así, el diámetro de las galerías ha pasado de 7,10 m a 8,70 m; la longitud de las estaciones, de 75 m a 225 m; y la anchura de los andenes de las estaciones, de 4 m a 7 m. La velocidad de régimen prevista para los trenes es de 60 kilómetros/h, pudiendo alcanzarse como máximo los 100 km/h.

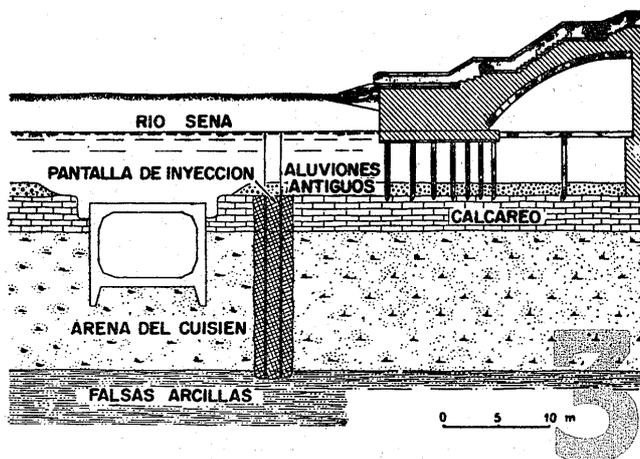
Para facilitar el avance del escudo utilizado entre La Défense y Neuilly, y para evitar hundimientos del terreno, con sus inevitables daños en la superficie, se procedió a crear un gel de sílice alrededor de la sección a excavar. Los sondeos de inyección se ejecutaron desde la superficie, a distancia de 1,8 m entre perforaciones contiguas. Así se creó alrededor del futuro túnel una bóveda resistente de 4 m de espesor, sostenida por dos pies derechos de 3 m de espesor (fig. 2).

El paso del Sena se ha realizado por medio de cajones de hormigón pretensado, de 35 m de longitud y de  $8,90 \times 6,20$  m de sección interior. Estos cajones fueron sumergidos por pórticos en el lecho del Sena, reposando en una cama ejecutada mediante una excavación realizada con aire comprimido. La excavación de semejante zanja, perpendicular a la corriente del río, presentaba grandes riesgos de desplome que, por una parte, hubiera tenido como consecuencia principal rellenar dicha zanja, y por otra, podría socavar peligrosamente la cimentación del puente de Neuilly, situada solamente a unos 15 m. Para evitar esta degradación del suelo se colocó, entre los cimientos del puente y el futuro túnel, una pantalla resistente de 3 a 4 m de anchura y 15 m de altura, mediante una inyección de un gel de sílice. Esta pantalla, además de proteger la cama en la que deberían depositarse los cajones, ha hecho posible reforzar los cimientos del puente (fig. 3).



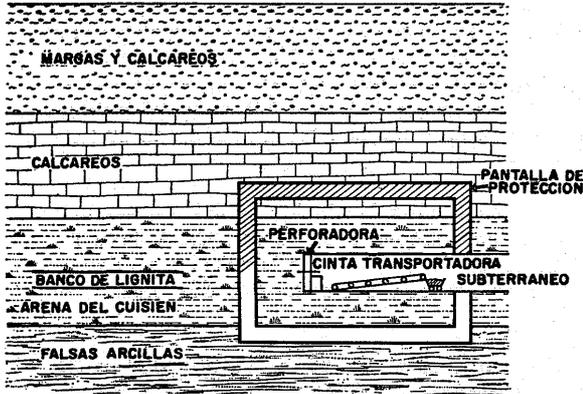
Parte subterránea de la Red Exprés Regional de París: Dispositivo esquemático del procedimiento de inyección de la parte de formaciones de aluviones y arenas interesadas por la excavación del túnel.

Red Exprés Regional de París: Disposición de la pantalla de consolidación de los cimientos del puente de Neuilly, sobre el Sena.

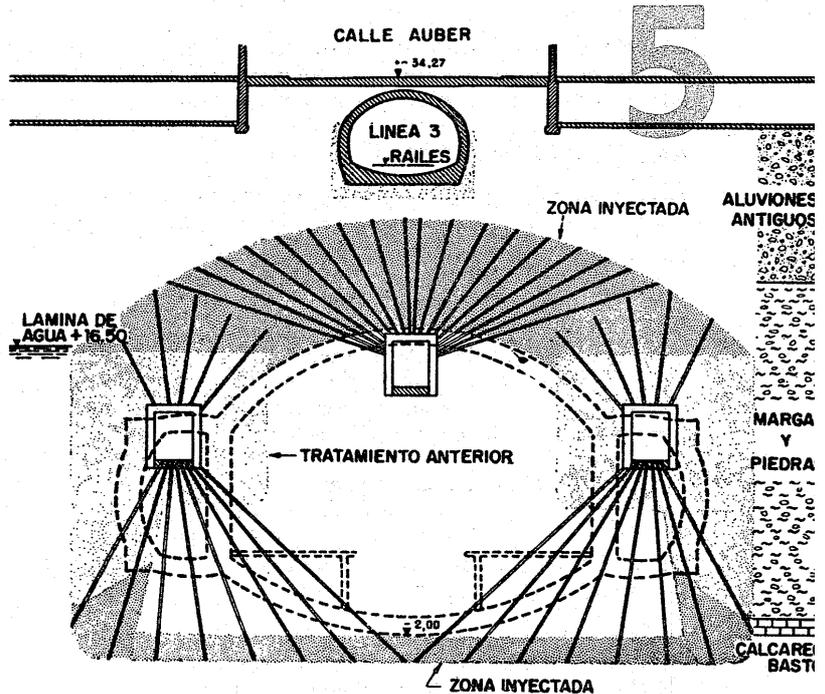


# 4

## OBRAS PORTE MAILLOT



Disposición esquemática de la pantalla protectora alrededor de la sección excavada con el minador continuo Robbins en el sector Porte Maillot.



Estación Auber de la R.E.R.: Esquema de la disposición del tratamiento de refuerzo de los terrenos alrededor de la sección a excavar.

El tramo Pont de Neuilly-Etoile se ha excavado empleando una máquina tipo Robbins, cuyo disco rotativo de avance tenía el mismo diámetro que la galería.

Para luchar contra la presencia del agua, que amenazaba con destruir el trabajo (efectuado a 30 m de profundidad), a medida que avanzaba la máquina se inyectaba delante de ella aire comprimido a una presión determinada.

A la altura de Porte Maillot las obras se vieron considerablemente entorpecidas y retrasadas al encontrarse unos bancos de lignito ricos en pirita. El lignito se inflamaba espontáneamente por el calor que desprendía la pirita al oxidarse. Para evitar el incendio de estas formaciones, se recurrió a las inyecciones de silicato de sodio. Por este procedimiento se colocó, a una distancia calculada y alrededor de la sección a excavar por la máquina, un caparazón estanco formado por una porción de terreno solidificado (fig. 4). Esta auténtica envoltura anular ha reemplazado eficazmente la acción del aire comprimido, descartando a la vez todo riesgo de que se inflamara el lignito, ya que el aire comprimido tenía el inconveniente de acelerar el fuego una vez que éste se manifestaba en la cama.

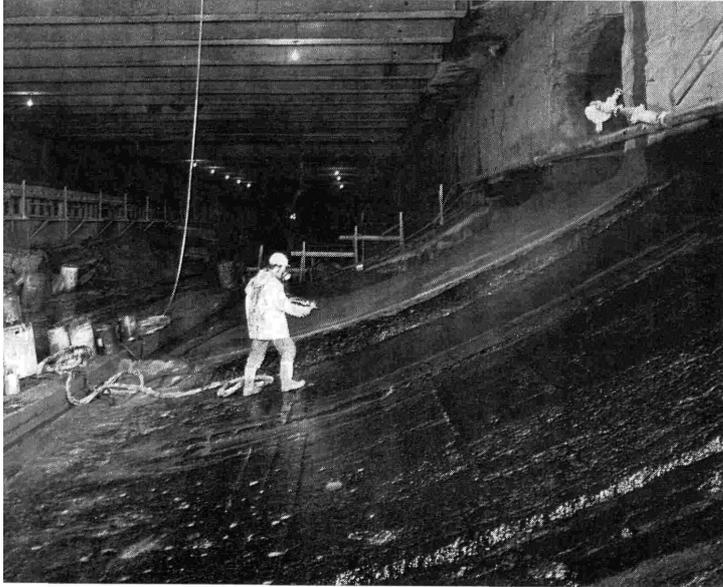
La estación de Auber comprende la parte más espectacular de la obra. Debe quedar unida a seis líneas de Metro y a la estación de San Lázaro. La excavación realizada tiene 39 m de anchura, 19 m de altura y 230 m de longitud y está situada bajo la calle de Auber y, además, bajo la línea de Metro Pont de Levallois-Bécon-Porte des Lilas, alcanzando una profundidad de 36 m bajo la calzada. La consolidación de suelos tuvo que ser grandemente incrementada para evitar hundimientos que hubieran perjudicado a las obras e inmuebles ya existentes, tales como la línea de Metro situada encima, el colector principal del alcantarillado y otras numerosas canalizaciones.

En una primera etapa, después de haber consolidado la base de la actual línea número 3, se abrió una galería-piloto por encima de la futura estación. A partir de aquella, se consolidaron las zonas destinadas a recibir dos galerías de servicio laterales en los bordes extremos de la estación, tal como se indica en la figura 5.

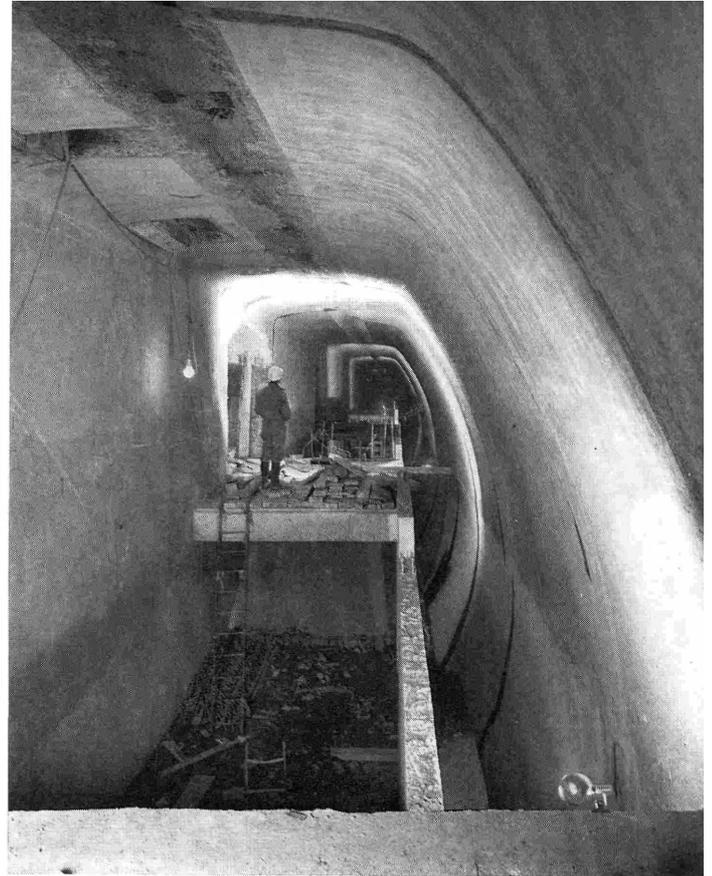
En una segunda fase, a partir de estas tres galerías, mediante sondeos radiales se consolidaron los terrenos que rodeaban la bóveda de la estación, en un espesor de unos 7 u 8 m, mientras otros sondeos descendentes permitían impermeabilizar la parte inferior de la estación. De este modo, todas las formaciones móviles y acuíferas quedaron estabilizadas antes de que comenzara cualquier trabajo de excavación.

Se podían aplicar distintas soluciones según las capas geológicas afectadas por las obras de la R.E.R., tanto más cuanto que era preciso trabajar en la capa freática, bajo una carga que representaba de 5 a 15 m de agua en los puntos más bajos.

La R.E.R. subterránea está implantada en terrenos depositados a principios de la Era Terciaria: arenas de Beauchamps, calizas de Saint-Ouen; margas, conglomerados y calizas del Luteciense y arenas del Cuisiense.

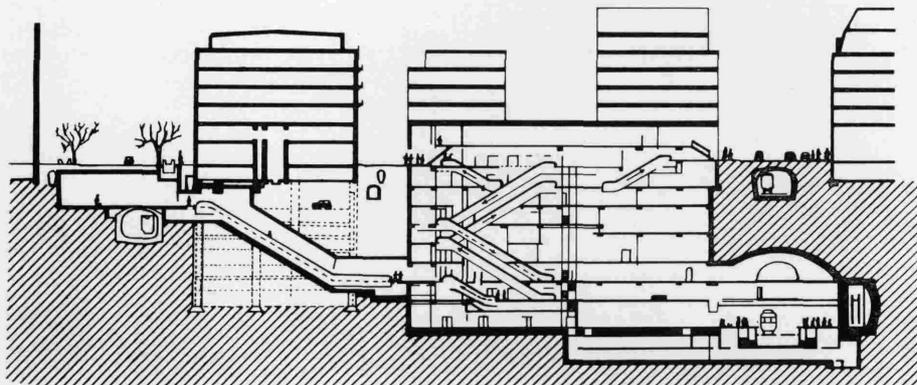


Estación AUBER  
Revestimiento impermeabilizado  
con resina EPOXI



Por otra parte, quedaban involucrados otros terrenos, no en la ejecución de las obras propiamente dichas, sino por los problemas de cimentación que presentaban y, particularmente, por las repercusiones en los riesgos de subpresiones de obras enterradas en estructuras ligeras, como complejos estación-aparcamiento comercial. Obras que manifiestan una cierta tendencia «a flotar», debido a las subpresiones, pueden situarse en los niveles de arenas de Auteuil, por ejemplo. Las arenas poco consolidadas han causado buen número de preocupaciones, y la congestión de las calles de París no hacía posible situar los ataques en los puntos que hubieran sido más favorables. Se pueden imaginar también las dificultades para evacuar los escombros.

La gran velocidad de los trenes originaba servidumbres de trazado en planta, cuando el radio mínimo de las curvas es de 600 m. Evidentemente, podía aceptarse un radio menor en las entradas y salidas de las estaciones. Otra servidumbre en el perfil longitudinal consiste en limitar rampas y declives a 30 mm/m. A título de comparación, el Metro de finales del siglo pasado o principios del actual admitía rampas de 40 mm/m, y los vagones motores del Metro sobre neumáticos, rampas de 70 u 80 mm/m.



Esquema de la estación Aubert de la R.E.R.: En esta sección transversal se ve, a la derecha, la vía férrea y los andenes, así como la gran sala de transbordo de los viajeros. En el centro, la obra de los accesos principales. A la izquierda, la sala Haussmann.

A principios de 1969 se puede calcular en 40.000 t la cantidad de silicato de sodio que había sido inyectada, transportada en camiones cisterna de 20 a 22 t a los lugares donde debía ponerse en obra. Algunos días se necesitaba el contenido de ocho camiones de silicato para garantizar la continuidad de las inyecciones.

El cuadro siguiente indica las longitudes perforadas y los volúmenes inyectados en algunas de las obras más importantes:

O B R A S	Longitud perforada (m)	Naturaleza de la colada	Volumen (en m <sup>3</sup> )
Subterráneo de la ribera izquierda del Sena (600 m)	80.000	Arcilla-cemento Gel de sílice	5.800 34.000
Pantalla de protección de los cimientos del puente de Neuilly	5.250	Arcilla-cemento Gel de sílice	600 3.700
Neuilly	81.000	Arcilla-cemento Gel de sílice	8.200 2.900
Estación Auber	110.000	Arcilla-cemento Gel de sílice Resinas fenólicas	20.500 5.500 2.000

El reactivo de las soluciones coloidales de silicato de sodio es el acetato de etilo. La inyección se puede efectuar a baja presión y el fraguado es retardado. Es fácil jugar con la viscosidad de una lechada, con la duración de su fraguado y con la resistencia que puede alcanzar el terreno tratado.

Las resinas fenólicas, que fraguan por polimerización en frío, son adecuadas para tratar las arenas más finas, pero su costo es elevado.

En los casos difíciles se puede empezar un tratamiento bloqueando los huecos mayores con una lechada de arcilla-cemento, entablicando a continuación el terreno por medio de inyecciones de silicato, para rematar la impermeabilidad total de la masa con las inyecciones de resinas fenólicas.

El método por congelación se ha utilizado poco.

En cuanto a las tres galerías-piloto excavadas para reconocer el volumen que había que suprimir para construir la estación de Auber, cada una medía 2,60 × 3,20 m, para permitir el empleo de máquinas de perforación e inyección, puesto que era precisamente desde estas tres galerías desde donde se pudo «petrificar» la totalidad de los terrenos interesados.

Las inyecciones fueron precedidas por un entibado clásico a base de gruesos maderos. Después, el maderamen fue unido por fuertes cimbras metálicas empotradas en una solera hormigonada.

Mediante gatos de 100 Mp, que trabajaban bajo la clave, fue posible «reelevar» las planchas de blindaje del techo de modo que se recuperasen hasta 5 ó 6 cm de descompresión en la bóveda de las galerías. Estos 5 ó 6 cm, recuperados de intento, se habrían podido traducir en 1 cm de asentamiento de los edificios situados en los niveles superiores.

Una vez terminadas las galerías, se pudo proceder a las excavaciones laterales y después hormigonar progresivamente la parte superior de los estribos hasta formar un tubo. En seguida, se construyeron los pies derechos por el método de bloques alternados. La construcción de la bóveda ha comenzado después de la de los dos estribos. La misma técnica se ha utilizado en las estaciones de Etoile y Nation.

Las bóvedas están hechas con dovelas prefabricadas, puestas en obra por anillos de 0,80 m de largo, al ritmo de un anillo diario. Por tanto, se ha necesitado un año para colocar lado con lado todos los elementos de los anillos de la bóveda. Las dovelas presentan una forma particular que les permite cierta libertad de movimientos entre sí. Fueron colocadas con una máquina especial, que actuaba simultáneamente de cimbra, permitiendo también reelevar las dovelas.

La acción de los gatos aplicados en las dovelas de la clave permitía «tensar» el arco, comprimirlo contra el terreno y producir desde ese momento una cierta recompresión. Por consiguiente, a lo largo de todo el extradós de la bóveda, una recompresión lineal ha venido a completar, muy eficazmente, las precauciones tomadas.

En la estación R.E.R. de Nanterre-La Folie, que es la que está a continuación de la de La Défense, la vía férrea se encuentra a 20 m bajo la superficie.

Para construir la estación, de 228 × 28 m, se tomó la decisión de realizar una excavación en capas subsuperficiales de conglomerados y margas de 10 m de potencia, que descansaban sobre otras de caliza compacta que, a su vez, coronaban otras formaciones calcáreas alternativamente duras y blandas.

Los primeros 10 m fueron desmontados empleando las máquinas clásicas de excavación a cielo abierto, mientras las calizas subyacentes tuvieron que ser destrozadas con explosivos.

Los permisos administrativos de almacenamiento y utilización de explosivos fueron concedidos con las restricciones habituales por el Servicio de Control, que supone que las Empresas se toman excesivas libertades al margen de la «reglamentación».

En realidad, las voladuras a realizar estaban situadas a unos 500 m de las fachadas de cristales de la Facultad de Letras de Nanterre y aún más cerca de un barrio de chabolas. Se tomaron algunas precauciones para que los efectos de las ondas expansivas no afectaran a los edificios universitarios y para que eventuales proyectiles, impulsados por las explosiones, respetaran las barracas vecinas. Tras llevarse a cabo muchos ensayos con cargas de importancia creciente, para medir las vibraciones del suelo y de los muros de los edificios con ayuda de sismógrafos, se obtuvieron los valores de seguridad.

La altura del frente de ataque se calculó en 10 m y su amplitud en 28 m, que correspondía a la anchura de la excavación, es decir, a la de la futura estación que debería quedar encajada en ella. Se tomaron tramos sucesivos de 2,20 m, con 2,20 m de separación entre barrenos, que tenían 54 mm de diámetro. Cada voladura comprendía 13 minas, removiendo un volumen de 600 m<sup>3</sup>. El volumen total a excavar suponía 65.000 m<sup>3</sup>.

El explosivo utilizado fue un «Securex nitrado» Nobel, tipo N.40.R, en cartuchos de 40 mm de diámetro y de 500 g de peso cada uno.

Para facilitar el poder excavar la base, la dinamita se colocó en el fondo de cada agujero, como es habitual en las voladuras que se efectúan en Francia para ejecutar excavaciones masivas. Cada agujero recibió una carga de 20 cartuchos, o sea, 10 kg de explosivos (Tolamite y Nitraté), cuidadosamente atacados con arena fina y seca. El cebado se hizo con una mecha detonante que tenía intercalados microrretardadores, con intervalos de tiempo de 25 milésimas de segundo entre dos barrenos consecutivos. El dilatar la explosión en el tiempo disminuye no sólo la intensidad de la onda sonora, molesta para el vecindario, sino también las vibraciones del suelo, mejorando además considerablemente la fragmentación.

En el caso de la estación de Nanterre, el consumo total de explosivos fue de 14.300 kg para el conjunto de la excavación.

Los hormigones en masa, tal y como quedan al desencofrar, carecen de estética y no presentan los caracteres de luminosidad y efectos decorativos que se esperan de un revestimiento en una estación subterránea.

Ya en el número 226 de INFORMES DE LA CONSTRUCCION («Interesantes aplicaciones de las resinas sintéticas en obras de ingeniería civil») se hacía alusión a la estanquidad obtenida mediante el empleo de enlucidos de resinas epoxi en distintas estaciones de la R.E.R. y túneles de la S.N.C.F. Algunas fotografías ilustran todavía más el método de aplicación; en particular, la relativa a la impermeabilización de las dovelas de la bóveda en la parte del subterráneo de la R.E.R. cercana al Puente de Neuilly.

Las resinas Araldite, que son también de la clase epoxi, pertenecen al grupo de las «duroplásticas».

Para que las resinas epoxídicas pasen al estado termoendurecido hay que agregarles un aditivo de endurecimiento adecuado y convenientemente dosificado. También se pueden añadir, llegado el caso, mezclas minerales, pastas colorantes, aceleradores o flexibilizadores. La reacción de endurecimiento se desarrolla sin tener que aplicar presión y supone un entrelazado de moléculas sin desprendimiento de productos volátiles, siempre nocivos en ambientes mal ventilados. La retracción de endurecimiento es despreciable y menor que en cualquier otra clase de resinas.

Una clase de resinas Araldite ofrece condiciones de puesta en obra particularmente favorables: endurecimiento a temperatura ambiente sin necesidad de aportar calor, perfecta adherencia al hormigón y una excelente resistencia a los ataques de la humedad.

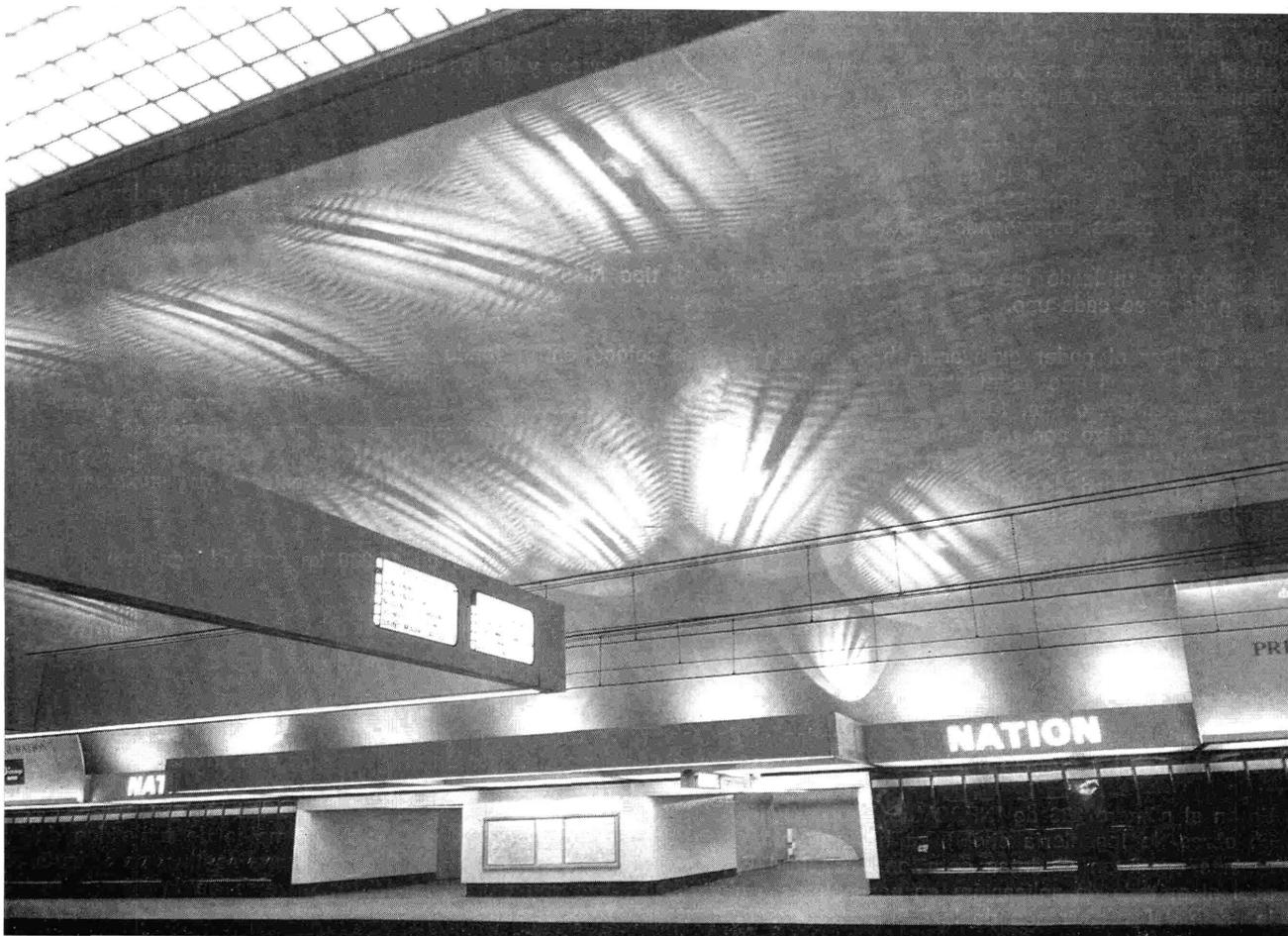
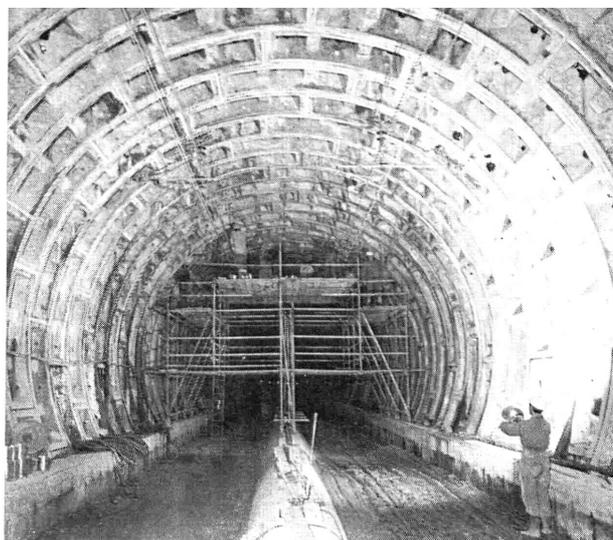
La experiencia adquirida en revestimientos de muros ha sido uno de los elementos determinantes de la elección de estas resinas para revestir toda la superficie de la bóveda de la estación Nation.

Para acrecentar la luminosidad y el poder reflectante de este revestimiento se añadieron bolas de vidrio, que proporcionaron bellos efectos centelleantes alrededor de las fuentes de iluminación, como indican las fotografías tomadas en la estación Nation.

**Pont de NEUILLY**

Impermeabilización de los arcos de la bóveda.  
Inyecciones de resina y colmatado.

Efectos de luz - revestimiento de resina  
con elementos de vidrio.



Fotos: Studio St. - BERNARD

**résumé**

**Nouvelles techniques de construction du métropolitain de Paris France**

G. Vié, ingénieur des mines

Les problèmes de déplacement et de transport des habitants de Paris sont à ce point aigus qu'une nouvelle entreprise s'est lancée dans l'agrandissement du réseau métropolitain. Les progrès de la technique ont permis de résoudre la construction de tunnels et de stations dans des conditions qui auraient été impossibles lors de la réalisation du réseau primitif. Dans cet article, l'auteur expose les exigences à satisfaire et les solutions adoptées.

**summary**

**New constructional techniques at the Paris Underground - France**

G. Vié, mining engineer

The transport of the Paris population within the city is becoming so difficult that a new organisation has taken up the enlargement of the current underground network. Technological advances in tunnel engineering are such that the construction of tunnels and stations is now possible under conditions which would have been impossible in earlier decades. In this article the project requirements and the adopted solutions are described in some detail.

**zusammenfassung**

**Neue Konstruktionstechniken der Untergrundbahn in Paris Frankreich**

G. Vié, Bergbauingenieur

Die Verkehrs- und Transportprobleme in Paris sind so dringlich geworden, dass sich nun eine neue Firma die Aufgabe gestellt hat, das Netz der Pariser Metro zu erweitern. Der heutige Stand der Technik bietet Möglichkeiten im Bau von Tunneln und Stationen, die früher, als das ursprüngliche Netz angelegt wurde, unvorstellbar gewesen wären. Der Artikel berichtet darüber, welche Aufgaben zu erfüllen waren und wie man sie löste.