

LA TECNOLOGIA "JET GROUTING - CCP"
EN LA PRACTICA INGENIERIL VENEZOLANA

Por: Gianfranco PERRI, Ingeniero Consultor y Profesor de
Mecánica de Rocas en la Universidad Central de Venezuela

RESUMEN

Después de una introducción sobre la tecnología del "Jet Grouting" y unas breves notas históricas sobre el "CCP", se pasa a describir los principios físicos sobre los cuales se fundamenta este método de inyección del terreno a elevadísima presión con el resultado de conformar estructuras columnares de elevadas características mecánicas constituidas por la mezcla íntima entre una sustancia cementicia inyectada y el mismo terreno disgregado por la energía del chorro inyectante.

Luego se pasa a describir las propiedades geométricas y mecánicas del terreno tratado y se ilustran los principios básicos que guían los criterios de diseño de las obras CCP, y se complementa la descripción del método "Jet Grouting", con referencias a sus principales aspectos tecnológicos relativos a los equipos y a las metodologías operativas empleadas.

Finalmente se describen un conjunto de seis (6) aplicaciones de la tecnología "CCP" ejecutadas en diferentes ocasiones y con distintos objetivos para obras del Metro de Caracas, permitiendo tal descripción ilustrar los posibles alcances de aplicación del "Jet Grouting" en la ingeniería civil en general.

LA TECNOLOGIA "JET GROUTING - CCP"
EN LA PRACTICA INGENIERIL VENEZOLANA

Por: Gianfranco PERRI, Ingeniero Consultor y Profesor de Mecánica de Rocas en la Universidad Central de Venezuela.

INTRODUCCION

La construcción del Metro de Caracas ha significado, entre otros logros, un notable salto cualitativo en la práctica ingenieril venezolana habiéndose constituido en un poderoso elemento motor actuando como constante estímulo sobre la ingeniería del país, llamándola al reto permanente de enfrentar y solucionar problemas no rutinarios y muy a menudo en nada sencillos.

Evidentemente, como lógicamente ocurre en tales circunstancias, las experiencias rápidamente se extrapolan, desbordándose de su cuna, para ser aplicadas y adaptadas a otros ambientes, y finalmente entrar a pertenecer al patrimonio tecnológico de toda la comunidad ingenieril del país.

Un claro y contundente ejemplo de lo anterior lo constituye la tecnología CCP, introducida en Venezuela en el año 1979 con el objetivo específico de resolver un problema contingente relacionado con la excavación de los túneles gemelos del Metro de Caracas en una sección de la Línea 1 (ver ejemplos de aplicación).

Para aquel entonces se trataba de una tecnología que, además de ser completamente desconocida en el país, era novedosa y aun en fase semiexperimental, habiendo sido introducida en la práctica ingenieril solamente pocos años antes, a principios de los 70, por la empresa japonesa Konoike Construcción Co., después de su invención por Wataru Nakanishi y su presentación al mundo científico por el prof. G. Miki de la Universidad de Tokio (Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones en Moscú, 1973).

CCP es la sigla de "Chemical Churning Pile" y representa una técnica de consolidación del terreno que y consiste en proyectar en el medio a tratar, a través de un inyector ubicado en el extremo ascendente de un tubo y con una presión elevadísima, una mezcla estabilizante de manera que el terreno y la mezcla resultan íntimamente agitados y remezclados con lo cual, una vez completada la cementación, se logra una estructura columnar continua de muy elevada características mecánicas.

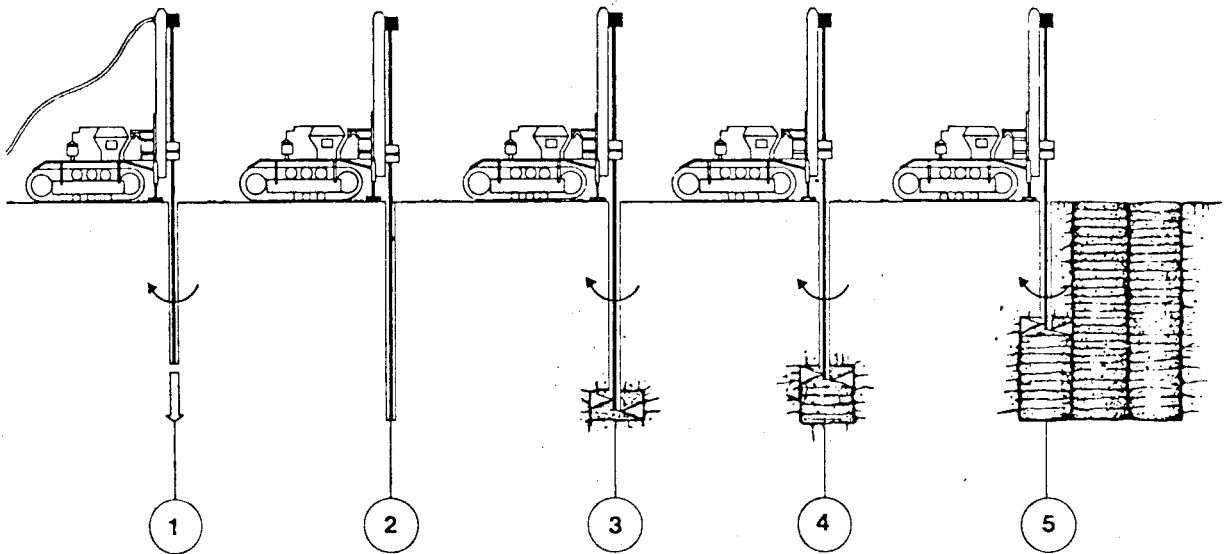
Evidentemente se trata de una nueva técnica de inyección que, debido a su peculiar capacidad de desgregar el terreno mezclando contemporáneamente con el fluido inyectado, permite tratar cualquier tipo de terreno que requiera ser mejorado mecánicamente, evitando los problemas de penetrabilidad relacionados con la granulometría del medio y evitando que, especialmente en terrenos de composición muy heterogénea, la sustancia inyectada siga vías preferenciales disponiéndose, ineficientemente, en vetas o en capas.

Adicionalmente, y nuevamente en contraposición con las técnicas tradicionales de inyecciones en terreno, con el "Jet Grouting", gracias a su peculiaridad de optimizar la energía de inyección y de garantizar la uniformidad del resultado en el sector tratado induciendo notables incrementos de la resistencia al corte del terreno natural, pueden utilizarse eficientemente espesores y/o volúmenes de tratamiento muy reducidos y selectivamente dirigidos en el espacio.

PRINCIPIOS FISICOS

El procedimiento CCP, representado esquemáticamente en lá fig. 1, se puede resumir como sigue:

Se introduce en el terreno un tubo, de 50 mm aproximadamente de diámetro, hasta la profundidad requerida. Durante esta operación una válvula que se abre o cierra automáticamente por diferencia de presión permite, desde un inyector ubicado axialmente en la base del tubo, la salida de agua bajo presión proveniente de una bomba, lo cual favorece la penetración del tubo como ocurre en las técnicas normales de perforación. Después de la completa penetración del tubo en lugar del agua se inyecta, desde la misma base del tubo pero perpendicularmente al eje, la mezcla estabilizante bajo presión sumamente elevada.



ESQUEMA OPERATIVO DEL SISTEMA CCP

- | |
|--|
| 1 — FASE DE PERFORACIÓN POR ROTACIÓN |
| 2 — FIN DE PERFORACIÓN |
| 3 — INICIO PROCESO C.C.P. |
| 4 — SUBIR DE NUEVO Y ROTACIÓN A VELOCIDAD PREESTABLECIDA |
| 5 — TERMINACIÓN Y REPETICIÓN DEL PROCESO |

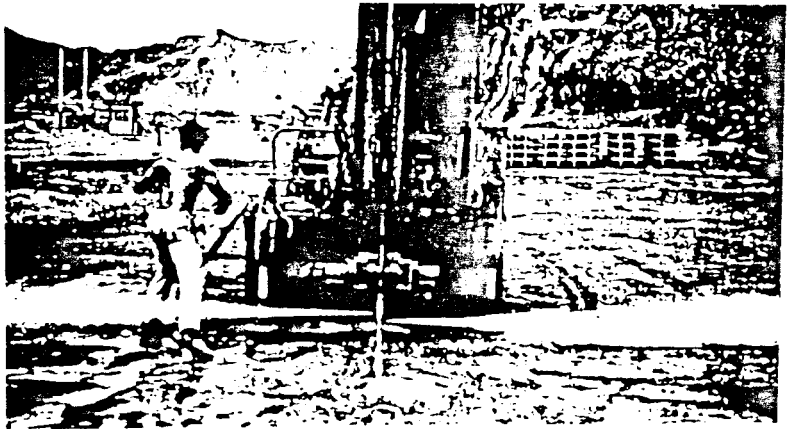


FIG. 1

Puesto que el tubo gira, esta operación de inyección afecta todo el entorno y hasta un radio que depende esencialmente de las condiciones del terreno, de la presión de inyección y de la naturaleza de la mezcla. En este radio queda completamente destruida la estructura original del terreno, el cual queda disgregado agitado y mezclado íntimamente con la sustancia inyectada.

Finalmente, debido a que durante la operación de inyección, el tubo también se eleva gradualmente, el tratamiento afecta sin solución de continuidad, niveles cada vez más altos y así gradualmente se viene conformando en el subsuelo alrededor de la perforación una estructura cohesiva con forma de columna.

Repetiendo las operaciones indicadas en distintas perforaciones puede ejecutarse, según las exigencias, sea un tratamiento continuo por medio de columnas adyacentes y eventualmente compenetradas entre sí, así como un tratamiento discreto de cualquier distribución requerida (Fig. 2).

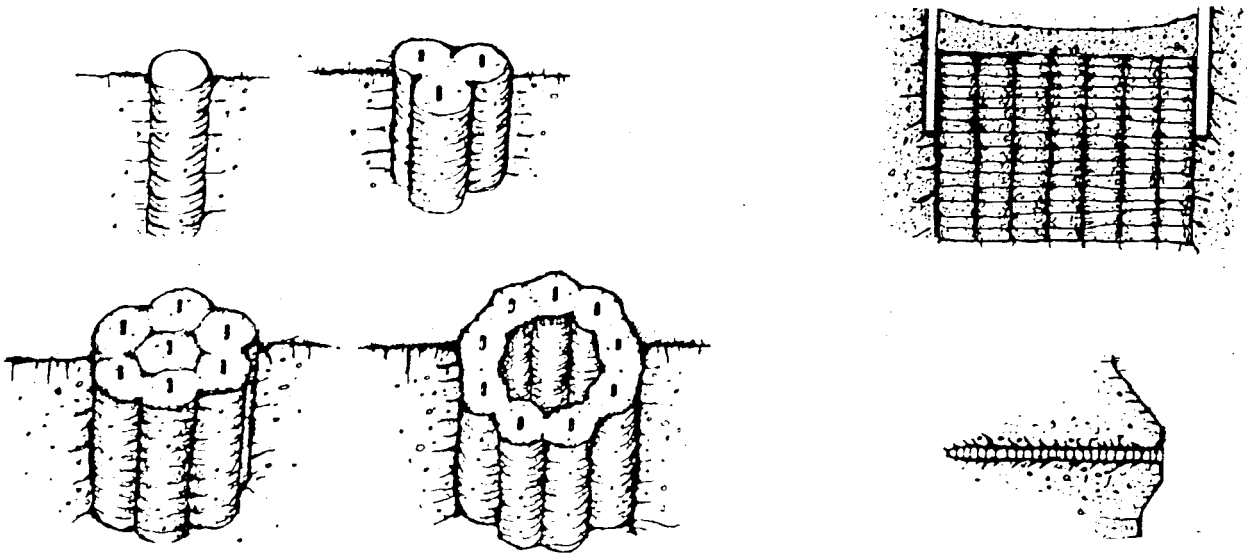


FIG: 2

En las aplicaciones normales, la presión de inyección es de 250 - 350 Kg/cm², el diámetro de las toberas del inyector es de 2-4 mm, la velocidad de rotación es de 20 revoluciones por minuto, la velocidad de elevación es de 15 cm por minuto y la cantidad de mezcla inyectada es de aproximadamente 30 litros por minuto de lechada agua cemento en proporción de (0.5 - 1.0) a 1.

Con el método arriba descrito, según las finalidades del caso, modificando en las mezclas estabilizadoras los porcentajes de los diversos agentes y tomando en cuenta la naturaleza del terreno, se puede obtener un producto final de 40 - 80 cm de diámetro, resistencia media a la compresión libre de 10 - 200 Kg/cm² (Fig. 3) y con coeficientes de permeabilidad de entre (10E-7 y 10E-9) cm/seg.

La columna CCP, generalmente cilíndrica, se forma de abajo hacia arriba debido a la acción del chorro de mezcla cementicia inyectada desde uno o más agujeros en rotación lenta y a elevadísima presión. El primer efecto resulta ser la instantánea disgregación del terreno circundante y el segundo efecto lo constituye la íntima mezcla de las partículas del terreno disgregado con el elemento cementante.

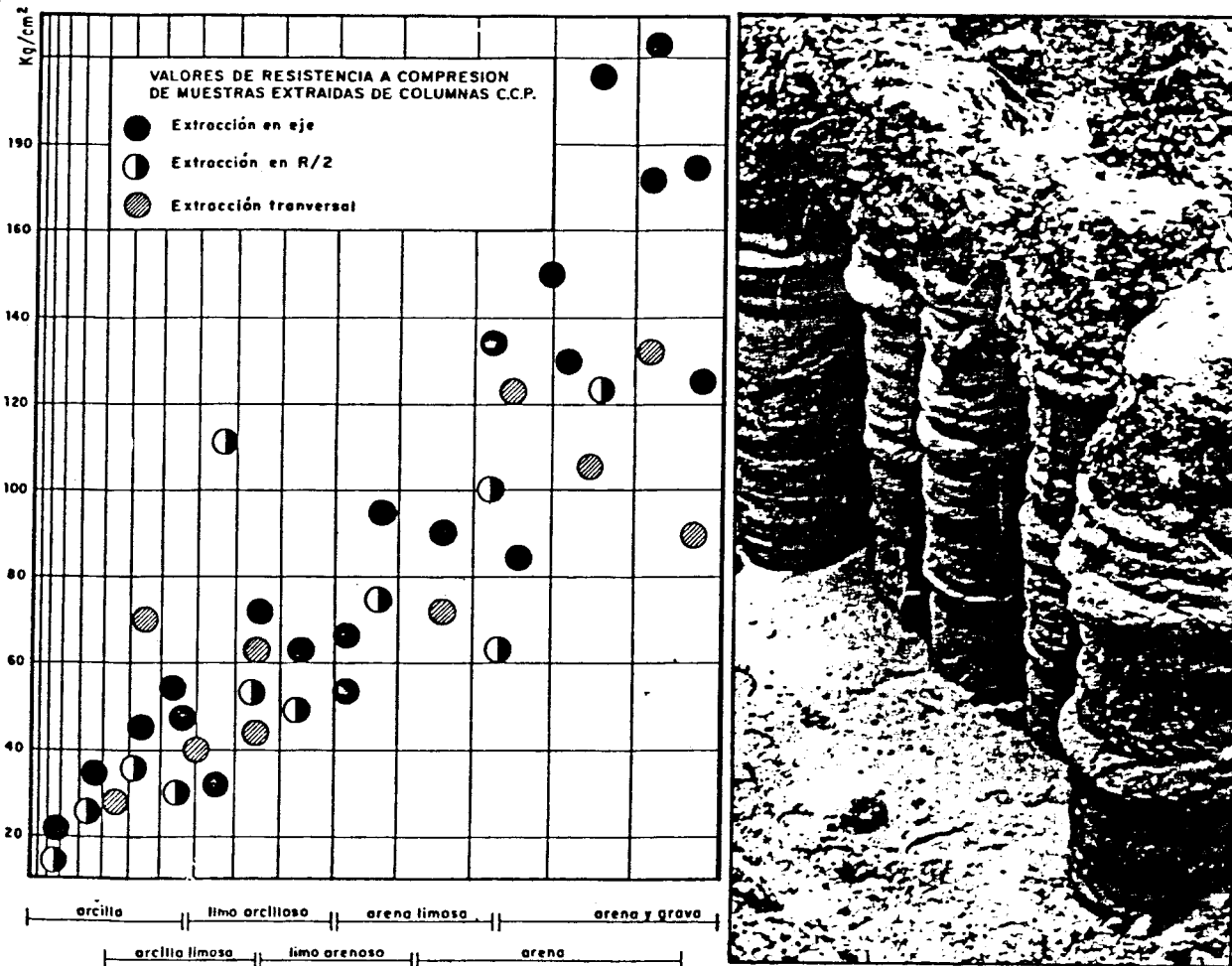


FIG: 3

Uno de los aspectos físicos más interesantes de la técnica descrita es el total agotamiento de la elevadísima presión del chorro inyectado, dentro de un radio limitado a pocos diámetros, eliminándose toda posibilidad de efectos colaterales indeseados sobre terrenos o estructuras próximas.

Intuitivamente lo anterior se explica observando que a pesar de las elevadísimas presiones de inyección (hasta más que 500 Kg/cm²), a todo lo largo de la barra de perforación e inyección rotante, normalmente se produce un reflujó de la mezcla inyectada, lo cual permite a la totalidad del volúmen de fluido constituyente el núcleo de la columna CCP en formación, de mantenerse a presión hidrostática, exceptuando el efecto dinámico del impacto del chorro, limitado estrictamente al tiempo y porción de terreno afectado directamente.

Adicionalmente y justamente debido a la citada acción dinámica concentrada y limitada en el tiempo y el espacio, se produce en el anillo de terreno que rodea la columna CCP, un efecto "claquage" de compresión y densificación dinámica que resulta siempre altamente beneficioso por cuanto da lugar a un mejoramiento geomecánico de la porción de terreno afectada.

Por otro lado en las aplicaciones que prevén la constitución de columnas CCP contiguas y compenetradas, el resultado es sorprendentemente positivo en el sentido de la continuidad de la estructura conformada, debido al "efecto pared" con el cual, si un chorro es proyectado contra una pared con fuerza suficiente no es reflejado, sino que se proyecta a lo largo de la superficie de la propia pared. Dicho efecto, cuando el chorro es proyectado contra un cuerpo columnar, hace que el chorro antes de alejarse rodea la superficie cilíndrica por un arco de más de 180 grados.

En términos más científicos, el fenómeno ha sido ampliamente investigado y una notable contribución al entendimiento de las características de los chorros ha sido aportada por K. Yanáida, quien partió de la suposición de que el comportamiento de chorros de soluciones químicas en el suelo es similar al de los chorros de agua turbocentrados en aire.

Yanaida en sus experimentaciones distinguió tres partes en la estructura física de un chorro (Fig. 4):

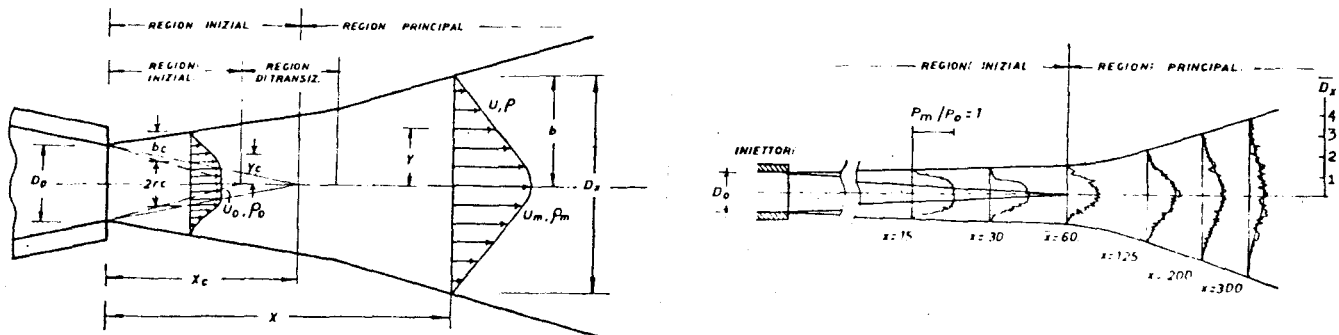


FIG : 4

- Una región inicial de longitud aproximadamente 20 veces el diámetro de la boca del inyector y presión P_0 .
- Una región de transición de longitud aproximadamente igual a la anterior.
- Por último, una región principal cuya longitud es de algunos centenares de veces el diámetro de la boca del inyector y presión P_m .

Yanaida realizó mediciones de precisión utilizando métodos fotográficos, eléctricos y con tubo Pitot, obteniendo para diferentes distancias desde la boca del inyector, las dimensiones del chorro (fig.5) y los perfiles de presión (Fig.6).

Se puede observar, entre otro que, dentro de la región principal, el ancho del chorro queda entre unos límites muy estrechos de aproximadamente 1.6 y 6.8 mm .

En lo que respecta a la variación de la presión a lo largo del eje del chorro de agua, los resultados obtenidos por Yanaida para un tipo particular de inyector y para los diferentes valores de número de Reynolds, indican reducciones de hasta un 80%, al límite de distancias del orden de 300 veces el diámetro de la boca del inyector, y de solamente un 20% para distancias del orden de 100 diámetros.

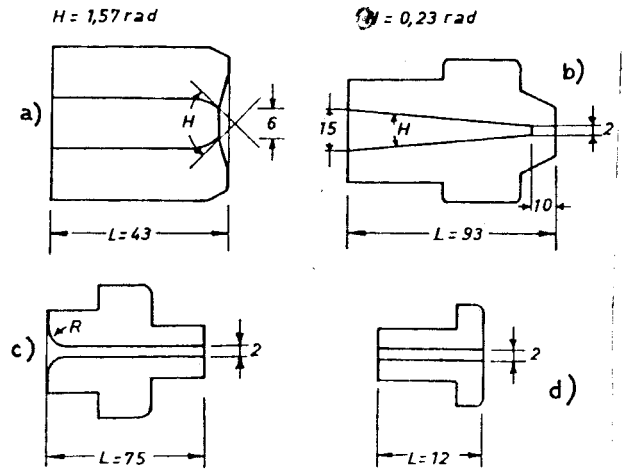
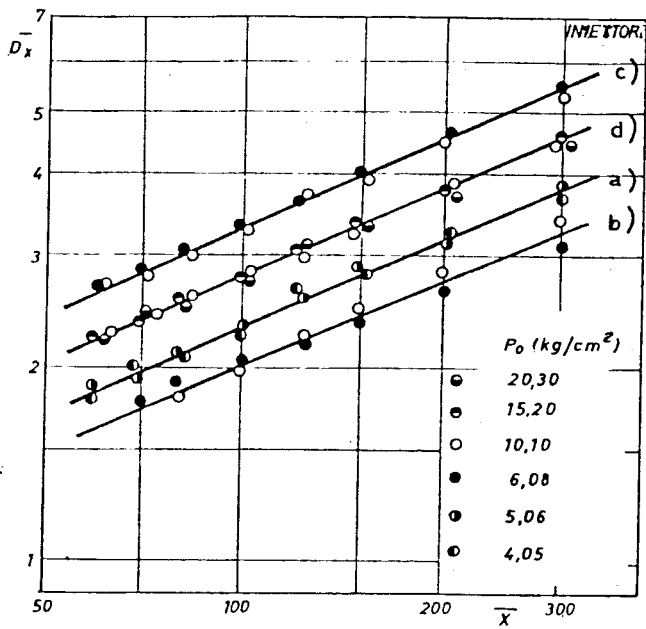


FIG: 5

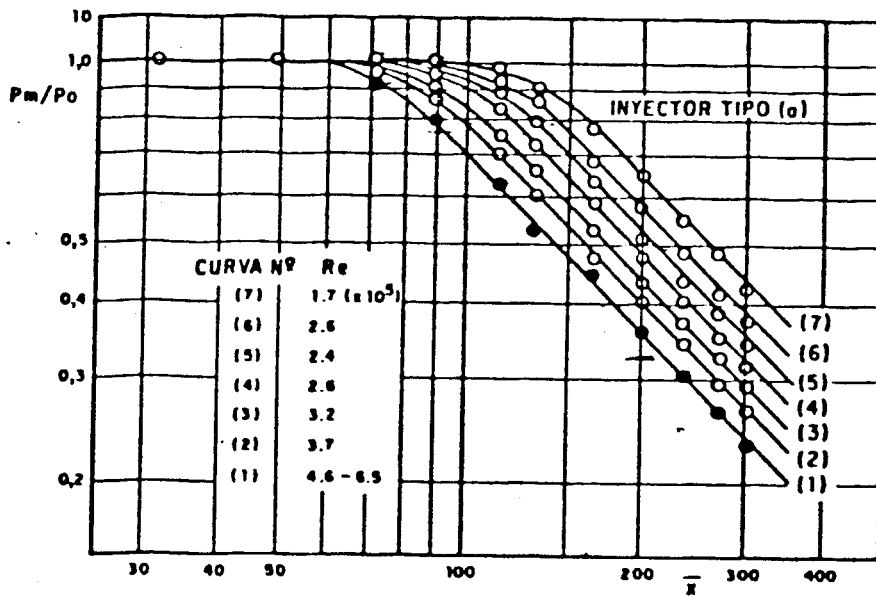


FIG: 6

También puede observarse como la presión, que es constante en la región más cercana al inyector, (región inicial), varía poco en la región de transición y finalmente decae rápidamente en la región principal.

CRITERIOS DE DISEÑO:

Dependiendo del tipo de aplicación dentro de la muy amplia gama de las posibles, adquieren mayor o menor importancia para el diseño los distintos parámetros involucrados, los principales de los cuales, agrupados en tres familias son:

- Los geométricos (forma, diámetro y longitud de las columnas aisladas o compenetradas).
- Los mecánicos de permeabilidad resistencia y deformabilidad, coeficiente de permeabilidad, carga de rotura a la compresión inconfiada, cohesión y fricción internas, módulos elásticos).
- Los de interacción terreno-estructura CCP (cohesión relativa, efecto arco, heterogeneidad axial del resultado).

Evidentemente los rangos numéricos dentro de los cuales pueden espaciarse cada uno de los parámetros citados, resultan muy amplios toda vez que dependen cada uno de ellos, de un conjunto muy numeroso de factores de los cuales solamente unos son controlables dentro de ciertos límites (los de inyección), mientras que otros dependen directamente del medio natural (terreno) en que se produce la intervención y el cual además, muy muy a menudo, resulta ser de composición heterogénea.

Por otro lado, y una vez más debido a la fundamental influencia que el medio natural ejerce sobre los resultados y sus propiedades mecánicas, éstas en fase de diseño podrán solamente estimarse con cierta aproximación, basado en correlaciones empíricas derivadas de la experiencia que afortunadamente hoy en día ya alcanza niveles de amplia confiabilidad.

Recientemente, autores brasileros (A. Teixeira 1987), han publicado los resultados de numerosos ensayos y correlaciones sobre muestras de columnas CCP en terrenos de granulometría fina (Fig. 7).

Site	Symbol	Qu (kgf/cm ²)	nr. of tests	σ' _t (kgf/cm ²)	nr. of tests	Curing time (days)	Soil type
Steel Mill, Campana, Argentina	(o)	33,8	10	3,8	10	20	Clayey Silt LL = 36% PI = 10%
		26,3	7	3,9	6	24	
		15,4	5	2,0	4	32	
		26,3	6	3,9	6	33	
		29,1	8	4,1	8	34	
		46,2	3	6,2	3	44	
		49,8	3	5,9	3	50	
		29,7	3	4,5	3	55	
		24,1	3	3,7	3	57	
		5,8	3	0,7	3	58	
		57,8	3	6,5	3	61	
		30,1	3	3,0	3	64	
		15,9	3	3,0	3	68	
53,2	3	5,0	3	71			
24,5	3	3,2	3	78			
New Orleans, USA	(+)	42,1 50,3	4	6,5 7,6	4	31 29	Silty Clay
Sanegran, São Paulo, Brazil	(o)	25,0	7	4,5	11	30	Fill of soft silty Clay LL = 55% PI = 20%
		19,4	12	3,9	20	30	
		14,2	12	3,0	6	30	
		30,8	12	5,6	6	60	
		27,3	9	4,1	15	60	
Harbour, Campana, Argentina	(A)	21,6	5	3,9	5	-	Silty Clay LL = 35% PI = 13% Cu = 1,5 tf/m ²
		12,5	6	2,5	6	-	
		6,4	5	1,0	5	-	
São Vicente, Brazil	(A)	45,7	3	6,5	2	39	Marine Clay SPI < 1 Cu = 2 tf/m ² Clayey fine Sand SPI = 4
		41,8	4	4,6	3	89	
		37,3	4	5,3	4	39	
		33,3	3	3,7	3	89	
Kenner, L.A. USA	(*)	47,0	4	7,1	4	29	Clay w/silt (SPT = 2 and 3)
		70,0	4	8,4	4	90	
		45,5	4	6,9	4	29	
		65,8	4	9,9	4	90	
La Plata, Argentina	(o)	38,5	1	7,7	2	36	Silty Clay
		29,7	1	5,2	1	36	
		54,7	1	9,5	4	36	
Terashi et al. (1979)	(+))	7,3	1	1,4	1	-	Marine Clay
		7,3	1	1,6	1	-	
		7,3	1	1,7	1	-	
		19,5	1	2,8	1	-	
		19,5	1	3,2	1	-	
Pinto (1962)	(o)	35,0	7	6,8	7	-	Sandy-Silty Clay LL = 45% PI = 30%
		26,8	7	5,1	7	-	
		16,6	5	3,1	5	-	
		4,4	1	0,7	1	-	
Kawasaki et al. (1984)	(*)	9,5	1	1,3	1	-	Silty Clay LL = 90 PI = 55
		18,0	1	2,1	1	-	
		20,0	1	2,3	1	-	
		26,0	1	2,7	1	-	
		27,0	1	2,9	1	-	
		32,5	1	3,7	1	-	
		36,5	1	3,7	1	-	
46,0	1	4,2	1	-			

FIG : 7

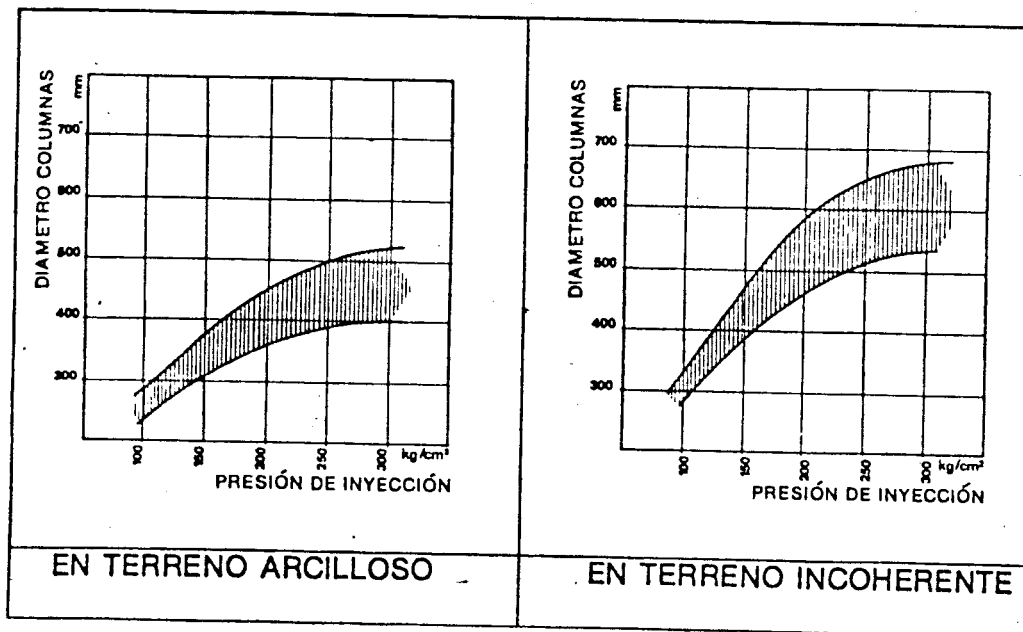


FIG : 8

En la figura 8 se presentan dos gráficos empíricos que relacionan el rango del valor del diámetro de la columna CCP con la presión de inyección y la granulometría del terreno, mientras que en la figura 9 se representan gráficos empíricos que proporcionan el rango del valor de la carga axial admisible (P_{ac}) de la columna CCP en función de su diámetro y de la granulometría del terreno, así como la resistencia a ruptura por compresión en función del diámetro de la columna el tipo de terreno y la cantidad de cemento utilizada por metro de columna.

Para obtener el tiempo de aplicación de la inyección, la velocidad de avance de la barra, el volumen de carato a inyectar y la cantidad de cemento por metro de columna, la CCP de Italia ha desarrollado el diagrama operativo reportado en la figura 10.

Conocido el diámetro del pilote, la cohesión del terreno, el número de golpes del SPT, la presión de inyección, la relación agua cemento, el número y diámetro de toberas, se opera de la siguiente manera:

1. Se entra al diagrama superior (A) con el valor del diámetro del pilote y se asciende paralelamente a las líneas del diagrama hasta encontrar el valor correspondiente de la cohesión del terreno.
2. Se prosigue horizontalmente hasta intersectar la curva con el valor del SPT.
3. A continuación se desciende verticalmente hasta el gráfico que sigue (B) donde está la línea horizontal con el valor de 2.000 PSI.
4. A este punto se desciende diagonalmente y paralelamente a las líneas del gráfico (B) hasta el valor de la presión a la que se desea inyectar; aquí se asciende verticalmente hasta la línea de 2000 PSI, encontrando así el volumen nominal de carato (Q) a inyectar por metro lineal del pilote.
5. Se desciende verticalmente hasta el final del gráfico (B), o sea hasta la línea horizontal de 7000 PSI.
6. Se desciende hasta el gráfico siguiente (C), paralelamente a las líneas diagonales, hasta el final del gráfico (C).
7. Con el número y diámetro de las toberas, en el gráfico (E) se asciende verticalmente hasta la línea horizontal con el valor de 7000 PSI en el gráfico inmediatamente superior (D).
8. Se asciende paralelamente a las líneas diagonales del gráfico (D) hasta cortar la línea horizontal con el valor de la presión a la que se desea inyectar.

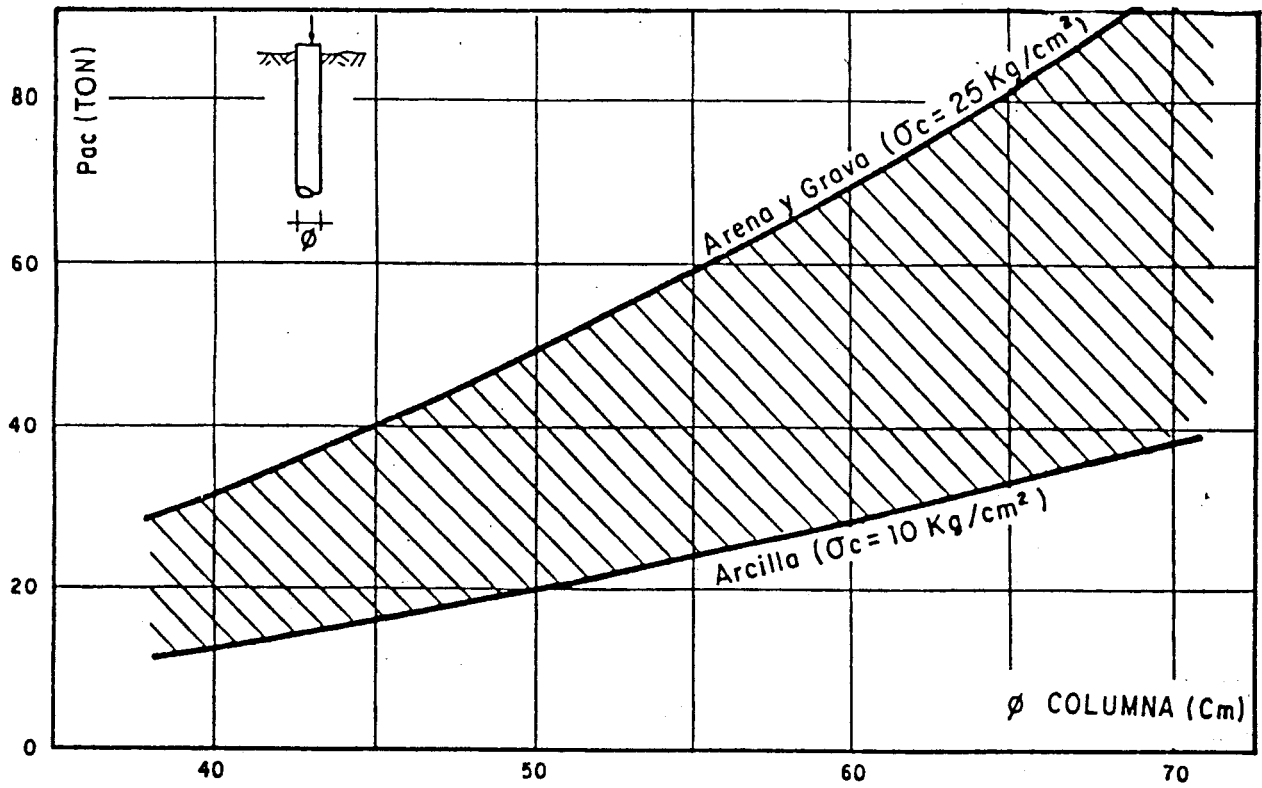
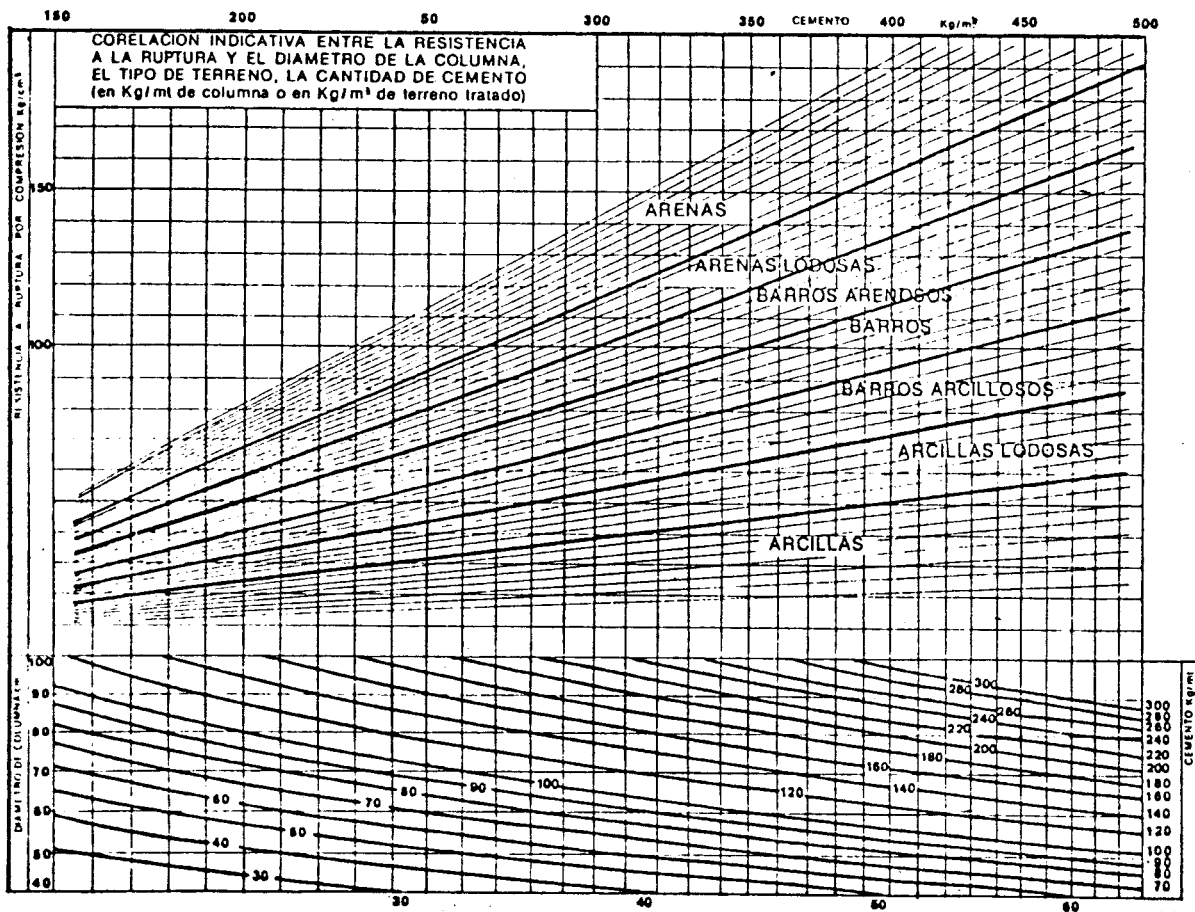


FIG : 9



9. A este punto se asciende verticalmente hasta el final del gráfico (D), donde se consigue la cantidad nominal de carato a inyectar a través de las toberas (litros/minutos).
10. Seguidamente se continúa ascendiendo verticalmente hasta intersectar la diagonal trazada (paso 6) en el gráfico (C), obteniendo así el tiempo de aplicación de la inyección por metro lineal de columna (minutos/metro).

Para obtener las cantidades reales de carato y de cemento a utilizar por metro lineal de columna, se deben multiplicar respectivamente los valores Q_1 y C que aparecen en la parte inferior del gráfico en función de la relación cemento agua (C/H₂O), por el volumen nominal de carato (Q) a inyectar derivado (paso 4) del gráfico, obteniéndose la cantidad en litros de carato (Q₁) que deberá ser inyectada y la correspondiente cantidad en Kilogramos de cemento (C) a utilizar en la mezcla.

ASPECTOS TECNOLOGICOS

Desde el punto de vista práctico-operativo, la tecnología CCP, así como ha sido descrita, incluye tres fases tecnológicas bien definidas y diferenciadas: la perforación, la inyección y el eventual armado de la columna.

De la perforación se ha definido su diámetro, de aproximadamente dos pulgadas, y en cuanto a su tecnología ésta debe elegirse en cada caso en función de la naturaleza misma del terreno a perforar, y tomando en cuenta los requerimientos específicos de la aplicación, en lo que a longitud e inclinación se refiere.

La técnica de perforación rotativa es preferible en terrenos de granulometría media a fina, debido a que en estos casos son suficientes equipos ligeros y el uso de un cabezal de rotación con "mandril pasador" sobre un "mast" de 4 - 5 metros, permitiendo éstos operar con un solo tren de barras de hasta 16 - 18 metros de profundidad y con producciones muy elevadas.

En terrenos de granulometrías gruesa y en presencia de bloques rocosos y peñones, la rotopercusión puede resultar más conveniente en términos de producción y a veces indispensable, requiriéndose para estos casos de equipos más voluminosos, con imposibilidad de usar trenes de barras largos, y finalmente con una productividad necesariamente reducida.

En cuanto a la geometría de las perforaciones, para los casos verticales las longitudes alcanzables son notables, (hasta 30 - 40 m con equipos rutinarios), mientras que la posibilidad de inclinación, resulta estrictamente condicionada por la versatilidad del equipo. Los equipos rutinarios permiten

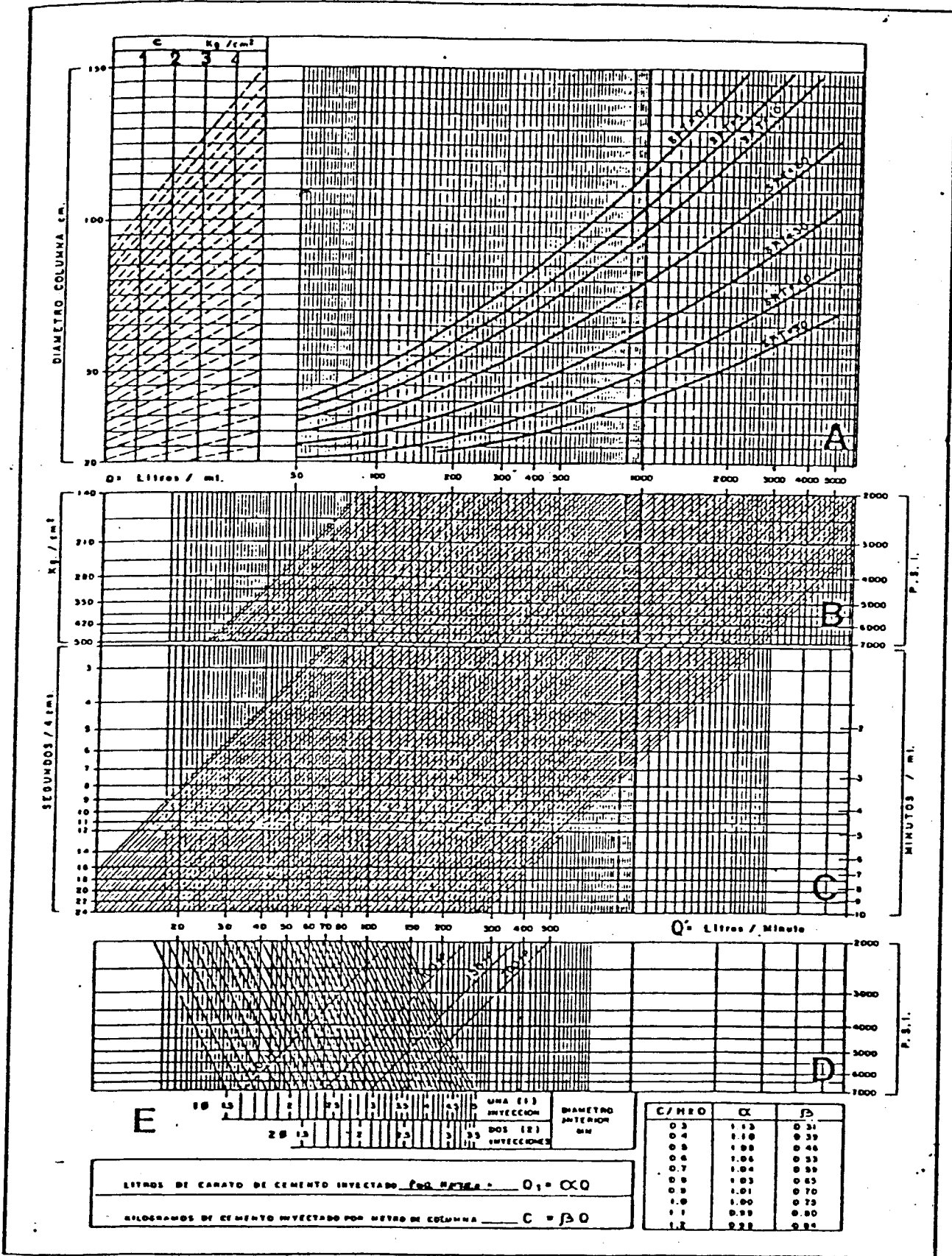


FIG: 10

inclinaciones de 45 grados sin mayores inconvenientes, mientras que para inclinaciones más próximas a la horizontal, deben utilizarse equipos especialmente preparados.

También se dispone rutinariamente de equipos de perforación-inyección de dimensiones muy reducidas que permiten operar en espacios mínimos y hasta en interiores de construcciones normales, evidentemente al precio de una menor productividad en la ejecución de la obra.

La inyección, en las aplicaciones rutinarias, utiliza el mismo equipo de perforación y sus peculiaridades tecnológicas están directamente relacionadas con lo elevado de las presiones en juego.

Se trata siempre de tecnologías sofisticadas en lo que a sistema de bombas y transmisión de la mezcla se refiere. Los equipos son muy voluminosos y se instalan a debida, y a veces grande, distancia del sitio de perforación e inyección, requiriéndose por lo tanto de un eficiente y muy seguro sistema de mangueras de transmisión.

También el sistema de preparación de la mezcla debe ser de tecnología adecuada a la elevada calidad requerida para el producto a ser inyectado, en relación a la precisión y constancia de las cantidades de elementos a mezclar, así como a la constancia pureza y calidad física del producto de inyección (el que finalmente será inyectado a través de agujeros de hasta un mínimo de un solo milímetro de diámetro).

Finalmente, para algunas aplicaciones específicas se hace preferible o necesario el empleo de refuerzo metálico para las columnas CCP.

Tal refuerzo puede ir desde unas sencillas barras metálicas (cabillas de hasta 1 y 3/8 de pulgadas) en el eje de la columna, las cuales se introducen muy fácilmente, con operación manual y caída libre por gravedad, inmediatamente al terminar el proceso de inyección.

Cuando las aplicaciones lo requieren, para el refuerzo se utiliza un tubo metálico estructural de hasta 4 pulgadas de diámetro el cual puede ser introducido a presión, inmediatamente después de completada la inyección, o mediante fácil reperforación, después de un fraguado mínimo de 12 o 24 horas.

Con esta misma técnica es también posible colocar una armadura zunchada requiriéndose evidentemente, en estos últimos dos casos, de completar el pilote con un nuevo vaciado a caída libre después de haberse colocado la armadura (Fig. 11).

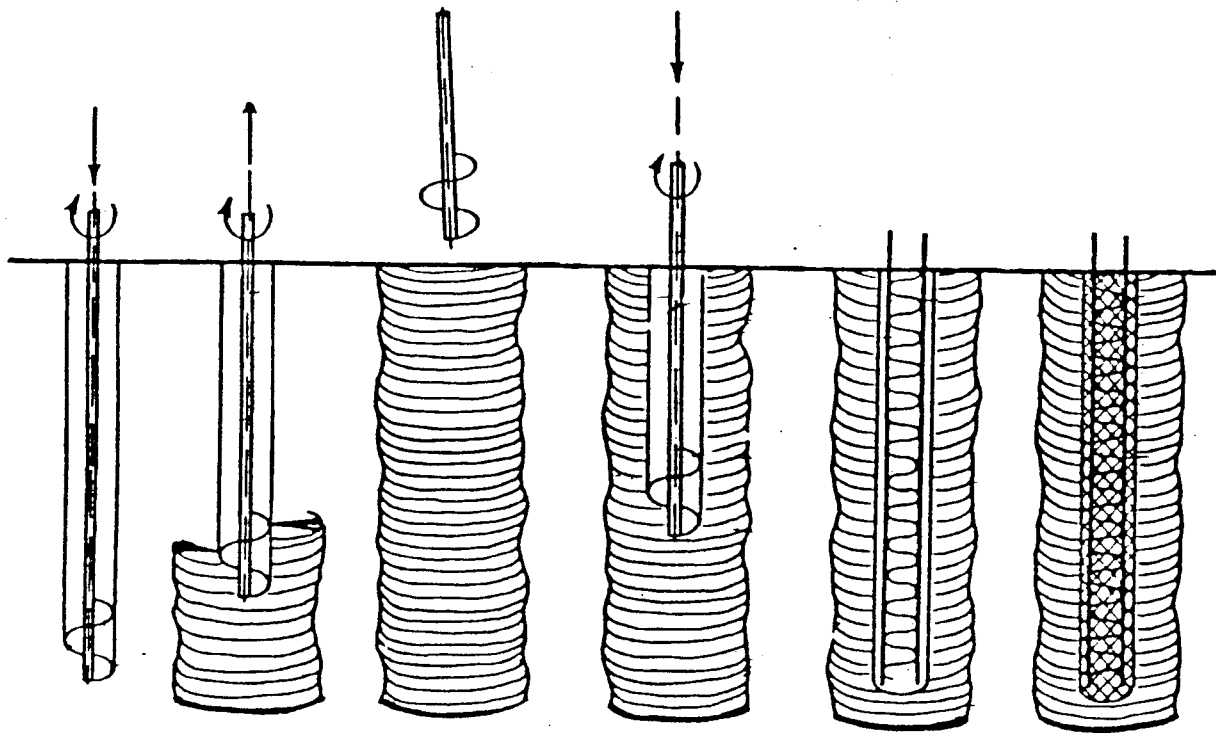
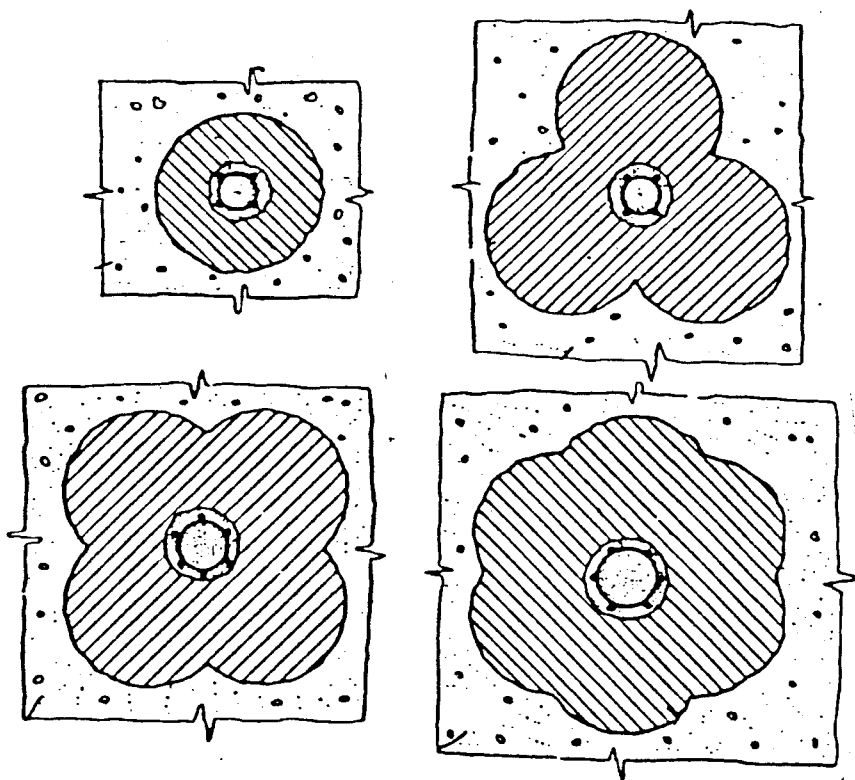


FIG. II



APLICACIONES PRINCIPALES

- 1) Protección lateral para los túneles a ser construidos y para los edificios adyacentes, entre las Estaciones Plaza Sucre y Pérez Bonalde de la Línea 1 del Metro de Caracas (Fig. 12), en presencia de dos acuíferos en mantos arenosos del subsuelo.

El primer nivel freático intercepta una serie de capas y lentes que se ubican por encima de la rasante superior de los túneles. El segundo nivel freático se encuentra por debajo de la subrasante inferior. Los dos acuíferos presentan presiones diferentes: el primero con una altura piezométrica correspondiente a la superficie del terreno y el segundo a 2 ó 3 metros por encima de esta superficie.

La solución ejecutada consiste en la conformación de dos pantallas subverticales continuas impermeables, ubicadas a los dos lados externos de los túneles en correspondencia de las aceras de la Avda. España y hasta 12 m de profundidad. La solución se complementa con el abatimiento del nivel freático en la franja comprendida entre las dos pantallas, previamente a la excavación de los túneles, la cual por lo tanto se ejecuta en condiciones óptimas y sin afectar los edificios adyacentes.

- 2) Estabilización del techo de excavación de los túneles del Metro de Caracas para limitar los asentamientos y consecuentes daños a las estructuras superficiales y subsuperficiales preexistentes.

A lo largo de importantes tramos de las Líneas 1 y 2 del Metro de Caracas ha surgido la necesidad de intervenir para evitar los asentamientos excesivos en la superficie o fallas locales (chimeneas) en correspondencia del frente de excavación o de la cola del escudo del "Topo".

Estos asentamientos o fallas afectan en forma importante las estructuras de los servicios, ubicados entre el techo del túnel (entre 5 y 8 m por debajo de la superficie del terreno) y el nivel de rodamiento de las avenidas suprayacentes.

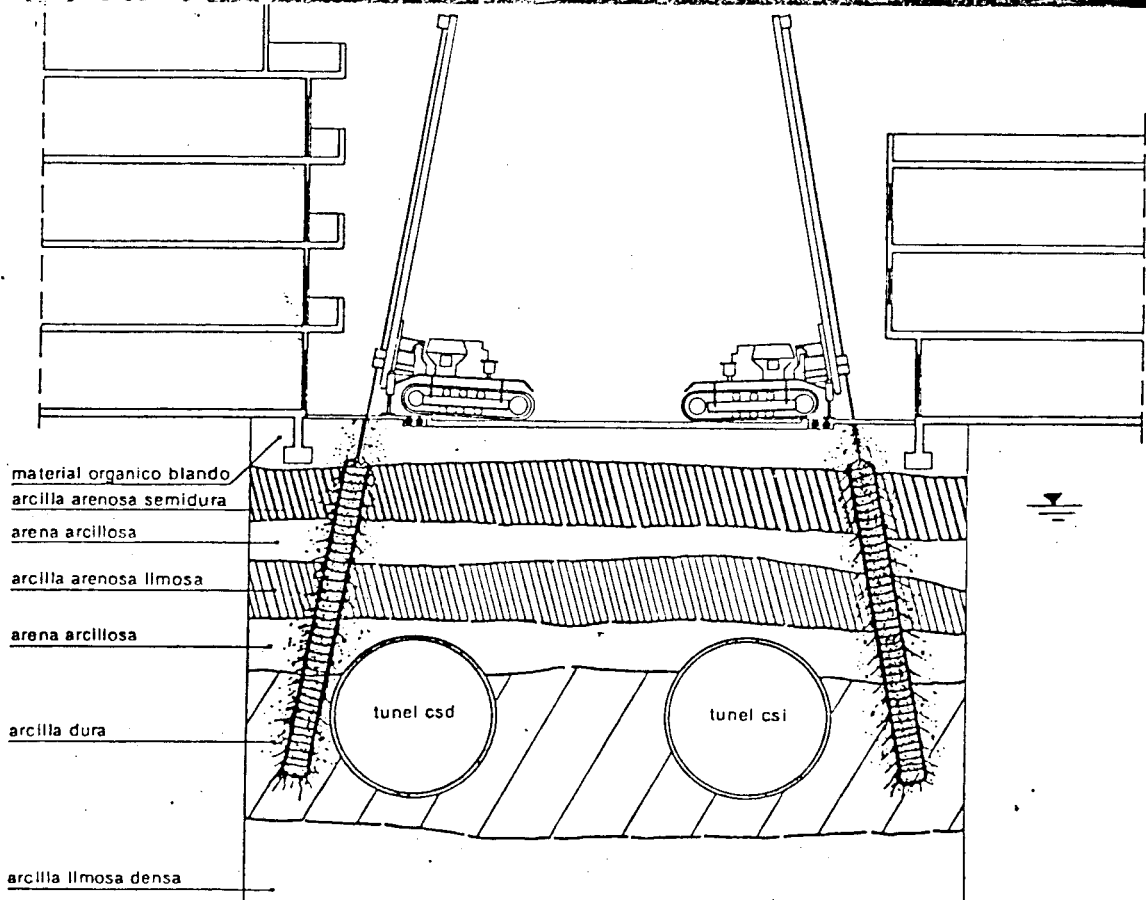
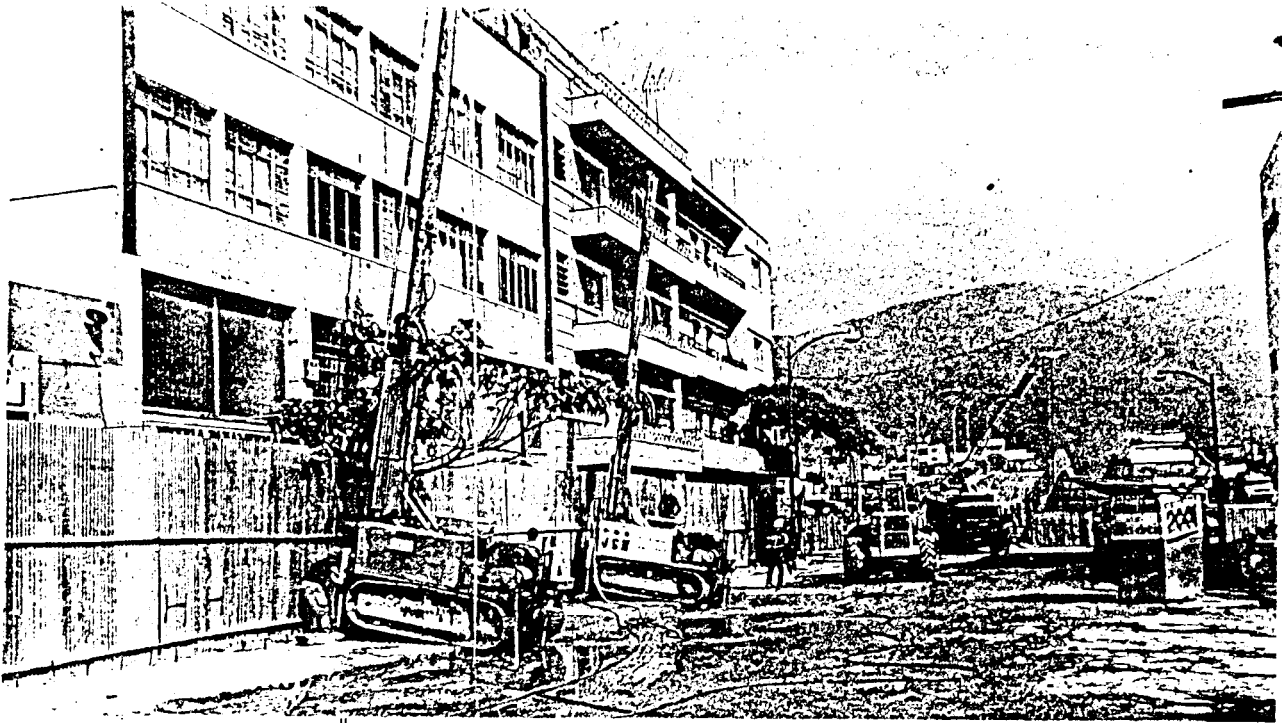


FIG : 12

Después de unas pruebas realizadas con el objeto de ajustar el esquema geométrico de la intervención CCP, (buscando un justo compromiso entre el costo de la consolidación y los asentamientos admisibles), se ha practicamente estandarizado un esquema estructural que prevee la ejecución de un techo casi continuo que hace de sombrero al túnel a excavar, y constituido por una doble fila de columnas CCP inclinadas y que se interceptan hasta conseguir el esquema geométrico deseado.

El intereje entre los elementos CCP de cada fila es generalmente de 1 m y los elementos de una fila con los de la otra, se ubican entre bolillo de manera tal que finalmente se ejecuta una columna CCP por cada 50 cm lineales de túnel, a lo largo de los tramos tratados.

En la Figura 13 se muestra uno de los esquemas geométricos típicos implementados a lo largo de unos 800 metros lineales de túnel entre los distintos tramos tratados hasta ahora.

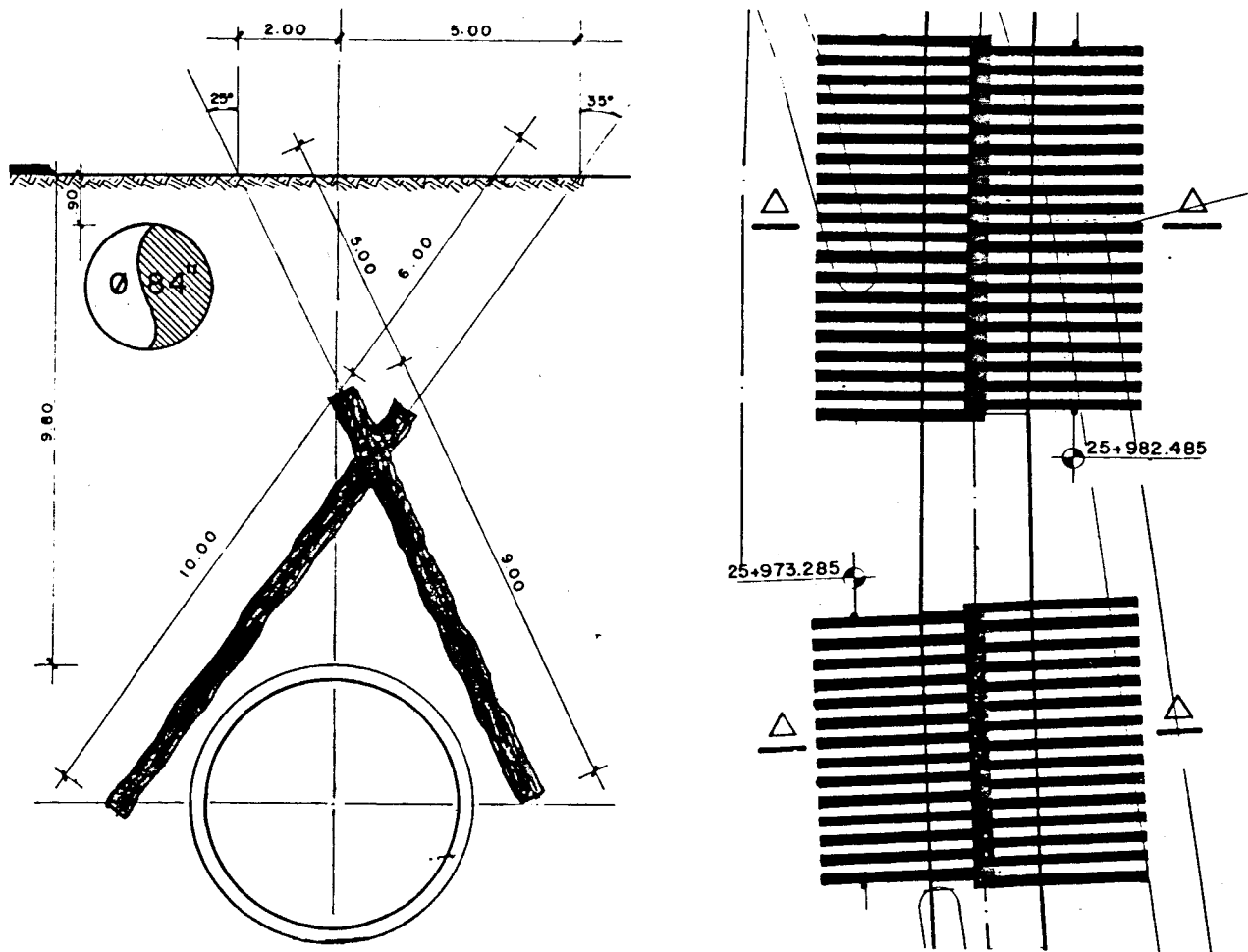


FIG : 13

En la Figura 14 se hace referencia a una aplicación particular de este tipo de tratamiento, utilizado para proteger de eventuales asentamientos excesivos la importante estructura del Puente Miranda sobre la Avda. Libertador, en correspondencia de la excavación de los túneles gemelos de la Línea 1 del Metro de Caracas.

- 3) Contracimentación del Puente Metálico en las adyacencias del portal este de la Estación Altamira del Metro de Caracas, previamente a la excavación de los túneles gemelos.

La contracimentación de estructuras apoyadas sobre fundaciones directas constituye una de las aplicaciones más rutinarias e interesantes de la tecnología CCP, toda vez que en éstas se aprovecha plenamente la versatilidad que el sistema presenta en el sentido de la ejecución de elementos estructurales de fundación, eventualmente inclinados y en espacios generalmente reducidos y limitados por los obstáculos de las estructuras a contracimentar.

En la Figura 15 puede observarse el esquema adoptado para soportar 3 zapatas superficiales, con cargas de servicio de 100 t cada una, mediante la ejecución de 8 columnas CCP por cada zapata, inclinadas 20 grados sobre la vertical, 20 m de longitud, y construídas operando en un espacio limitado en altura a poco más que 2 metros por la presencia de la estructura del puente a sostener.

- 4) Sostenimiento de las paredes verticales de excavación para la construcción de las estructuras de los pozos de drenaje en correspondencia de los portales de las Estaciones "Dos Caminos", "Parque del Este", "Altamira" y "Chacao" del Metro de Caracas.

Se trata de otra aplicación típica de la tecnología CCP: el sostenimiento de paredes verticales de excavación mediante una cortina de columnas compenetradas de longitud tal de quedar empotradas dentro del terreno una vez ejecutada la excavación.

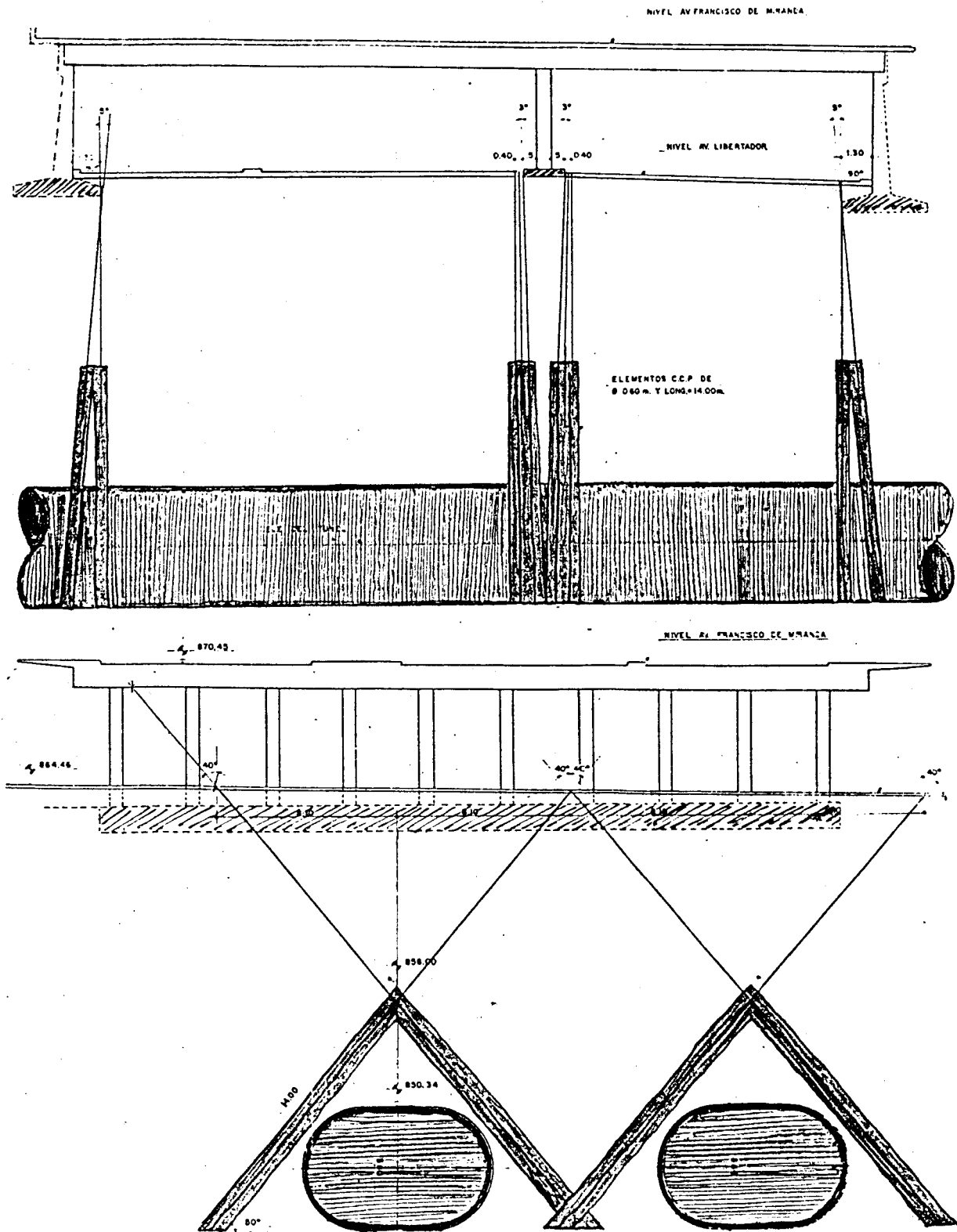


FIG: 14

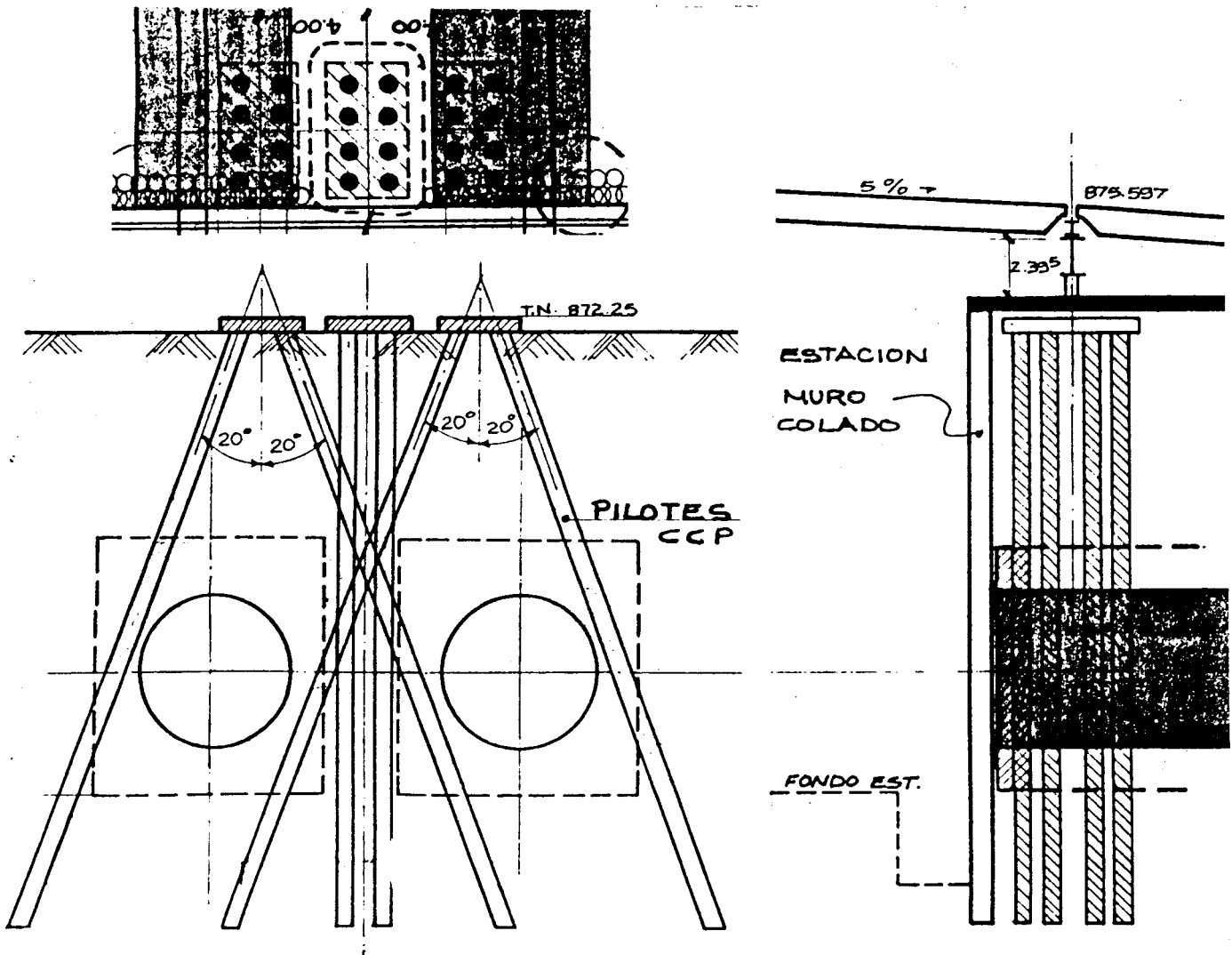


FIG. 15

En función del objetivo a perseguir y situación geométrica y geotécnica de la excavación, se dimensionan las longitudes de las columnas, el intereje entre ellas, la eventual armadura necesaria y los eventualmente necesarios vínculos adicionales (por ejemplo anclajes o puntales).

Para los casos específicos que se están presentando (Fig.16), la profundidad de las excavaciones no supera los 4 m de manear tal que los muros CCP han sido ejecutados para trabajar en cantiliver y compenetrados para garantizar la impermeabilidad debido a la presencia de niveles freáticos superficiales.

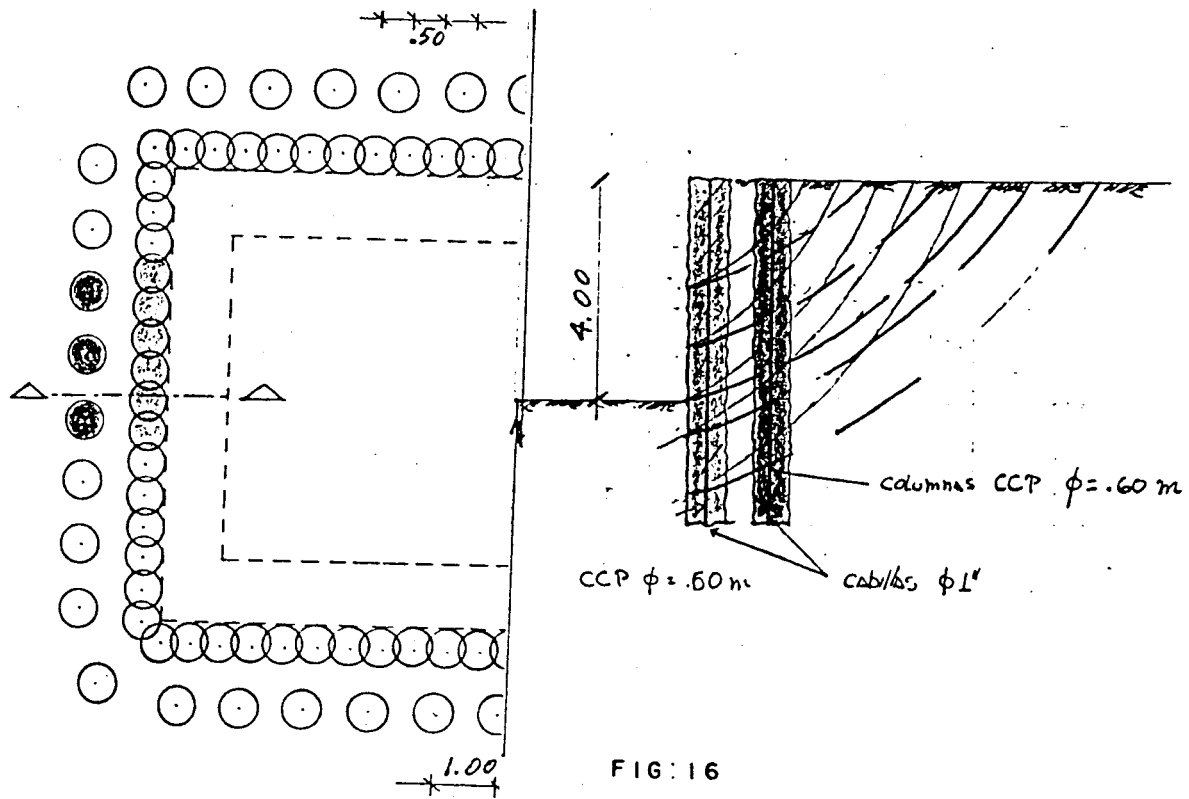
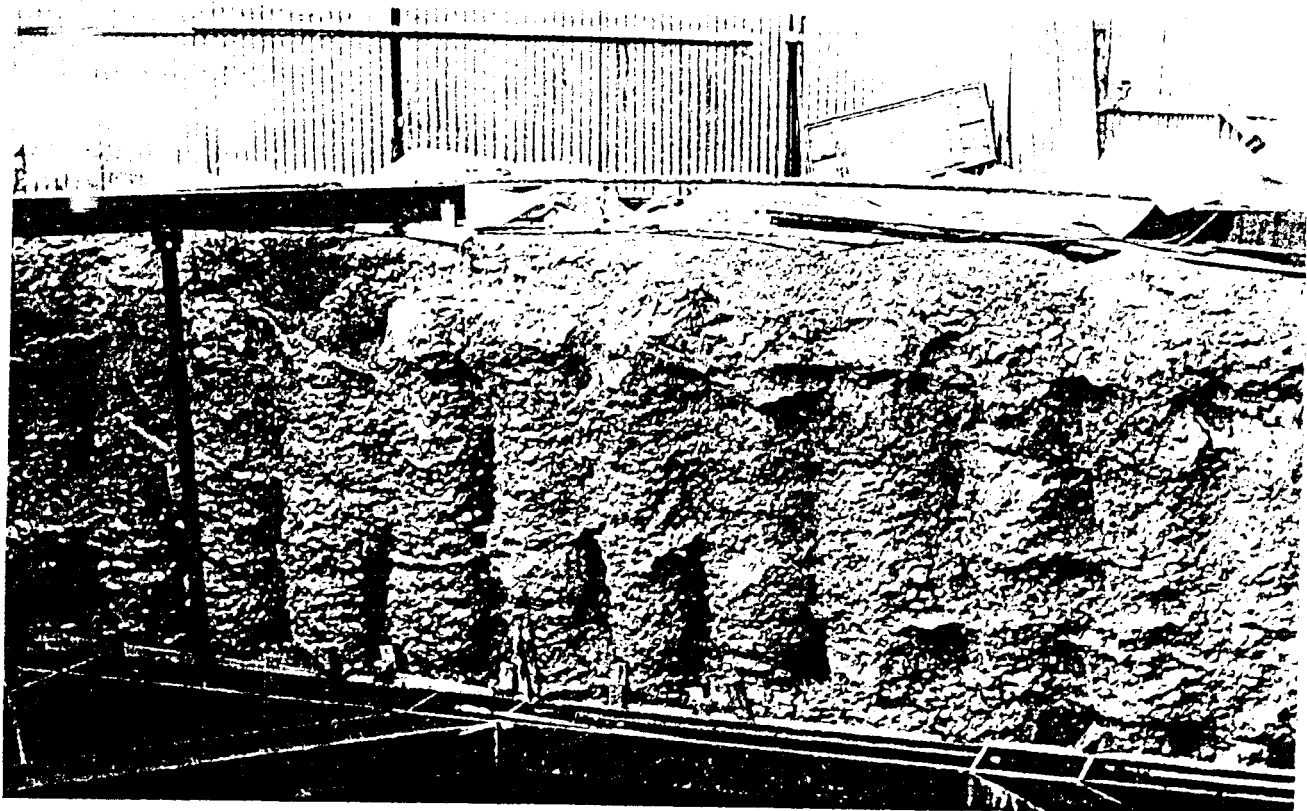


FIG: 16

- 5) Consolidación del terraplén del Metro de Caracas en un tramo a media ladera de aproximadamente 50 m de longitud, entre las estaciones Manera y Ruiz Pineda de la Línea 2.

Durante el período de pruebas de la línea, se manifestó un importante hundimiento del terraplén, y consecuentemente de los rieles, posiblemente debido a un defecto en la conformación de este terraplén y en coincidencia con la presencia de fuertes escorrentías sub-superficiales de aguas de lluvia provenientes de la ladera alta y drenantes hacia el río contiguo a la línea.

Siendo operativamente inconveniente de optar para una reconstrucción del tramo de terraplén afectado, se llevó a cabo una consolidación mediante la ejecución de columnas CCP dispuestas en abanico, según la geometría indicada en la figura 17, y en secciones adyacentes separadas medianamente 1.5 m a lo largo de los 50 m de línea afectados por el hundimiento.

Además de los problemas logísticos relacionados con la difícil accesibilidad para los equipos y con los reducidos espacios disponibles en la ladera entre línea y río, se usó particular diligencia en la ejecución de los elementos CCP más altos y más próximos al balasto de la vía el cual no debía resultar contaminado por la mezcla cementicia utilizada para la consolidación.

- 6) Consolidación del terreno de apoyo de la calota del túnel Cola de Maniobras El Silencio en la Línea 2 del Metro de Caracas, previamente a la excavación del banco y complementación del revestimiento.

Durante la construcción del túnel en referencia, a lo largo de un tramo de aproximadamente 40 m de longitud, el terreno en correspondencia de la "imposta" resultó de muy pobres características mecánicas por lo cual al momento de proceder con la excavación del banco y contrabóveda, el revestimiento de calota experimentada inaceptables asentamientos.

Se procedió por lo tanto a formular un esquema de tratamiento de consolidación con tecnología CCP, el cual se ejecutó según el esquema geométrico representado en la figura 18.

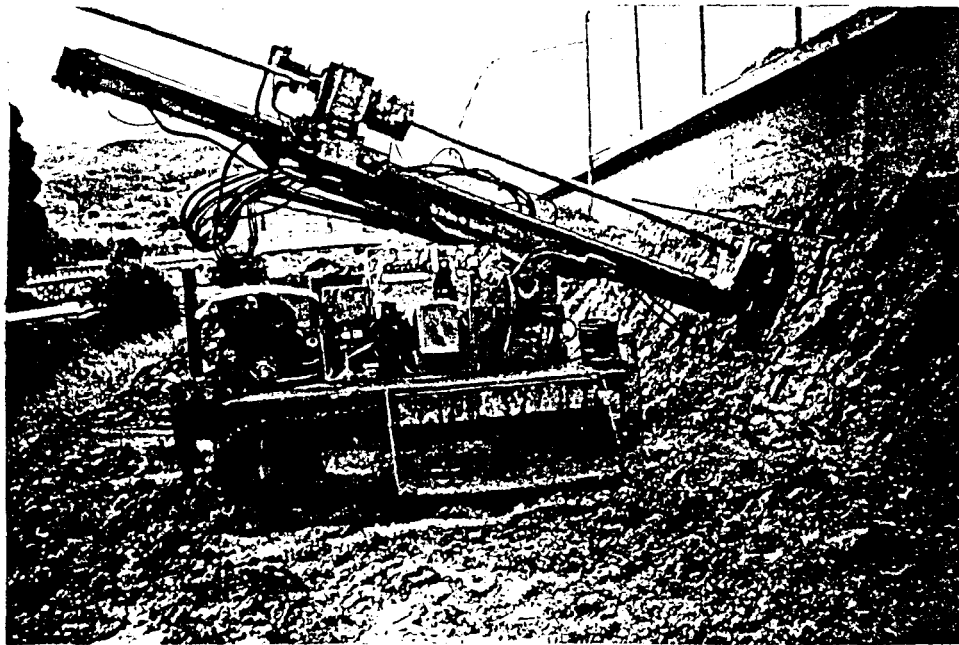
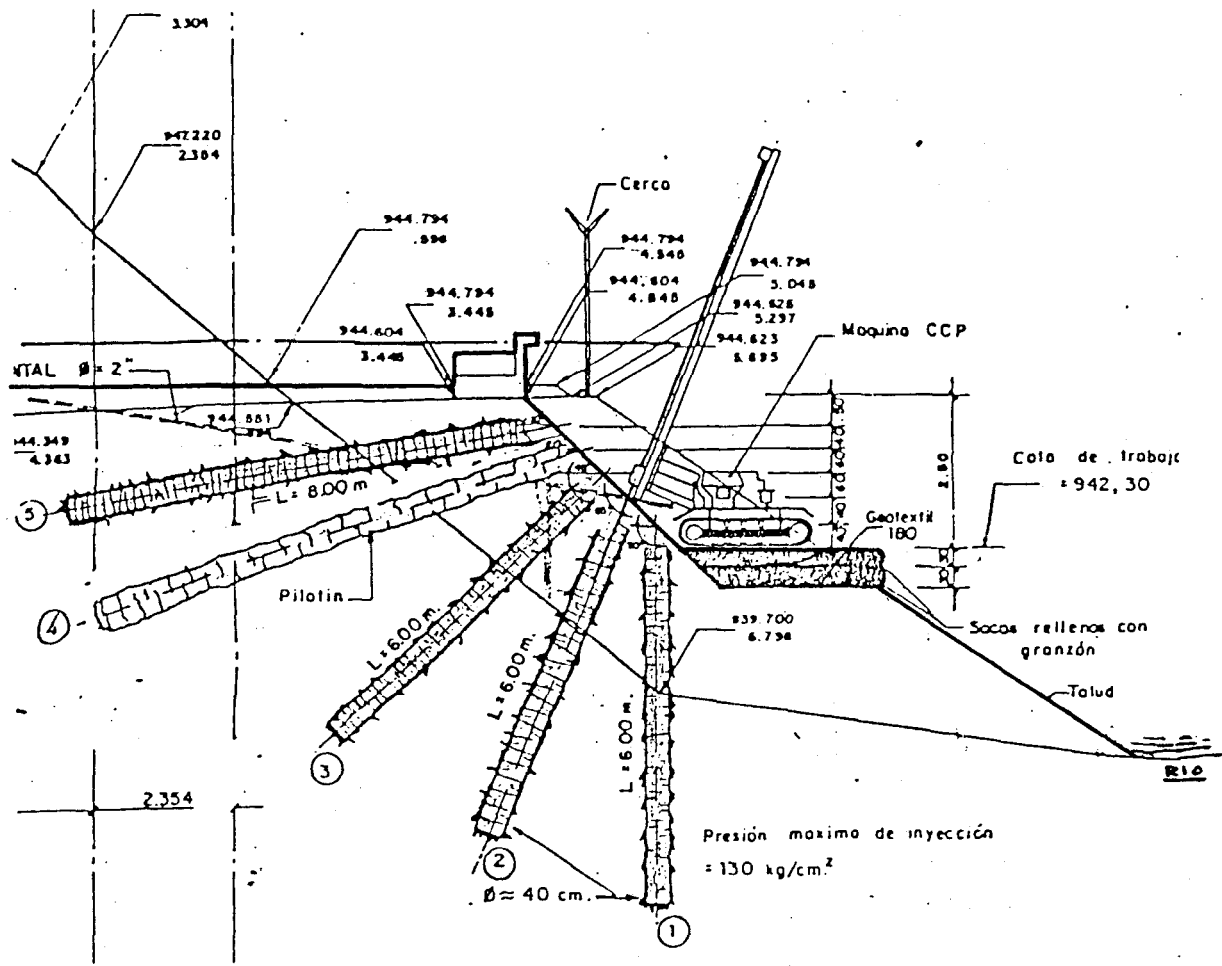


FIG : 17

Cada segmento de revestimiento de la bóveda, a soportar durante la segunda etapa de la excavación de la sección del túnel y hasta el vaciado y fraguado del revestimiento completo, cubre una longitud de 4 m, por lo cual el esquema de tratamiento hace referencia a cada uno de estos módulos estructurales.

El tratamiento incluye la ejecución en una misma sección geométrica, de 6 columnas CCP (de 0.6 m de diámetro nominal) inclinadas y compenetradas entre sí hasta conformar una pared vertical. A su vez tal pared se complementa con otras 4 adyacentes entre sí, para finalmente constituir un solo bloque de apoyo de aproximadamente 2.50 m de ancho, 4.00 m de alto y 2.00 m de espesor.

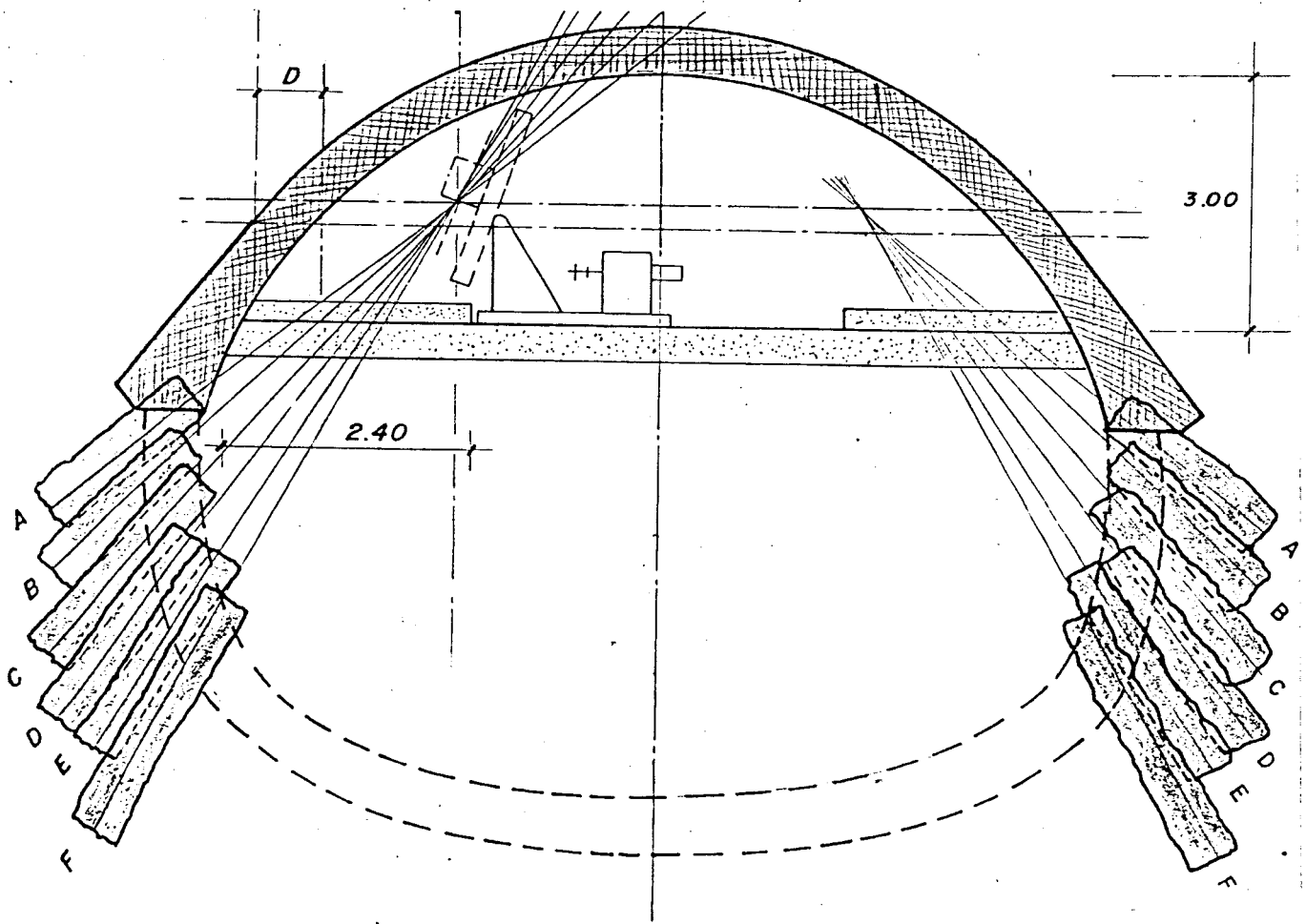


FIG: 18

CONCLUSIONES

Se han presentado algunas, dentro de las más representativas, aplicaciones de la tecnología del "Jet Grouting-CCP", escogidas de las numerosas ejecutadas para las obras del Metro de Caracas.

Por otro lado, así como se comentó en la introducción, en Venezuela el empleo del Jet Grouting ya ha sobrepasado repetidamente de los límites iniciales de las obras del Metro de Caracas y su utilización se ha hecho ya rutinaria en la solución de problemas de contracimentación de estructuras originalmente fundadas directamente sobre placas o zapatas aisladas, así como sobre pilotes.

Todos los resultados logrados pueden ser calificados de satisfactorios, habiéndose sistemáticamente cumplido con los objetivos específicos de cada aplicación, bien sea con carácter temporal como para todos los ejemplos ilustrados y relativos a obras del Metro de Caracas, bien sea con carácter permanente como han sido todas las aplicaciones relativas a contracimentación de estructuras preexistentes.

Finalmente vale la pena concluir señalando como las posibilidades de aplicar el Jet Grouting son realmente e intrínsecamente extensas, requiriéndose para ello, esencialmente del ingenio profesional del proyectista y de la continua experimentación, evaluación y transmisión sistemáticas de los resultados logrados.

BIBLIOGRAFIA

- P. Lunardi: "Il Preconsolidamento mediante Jet Grouting nella Realizzazione di Opere in Sotterraneo" ITA TUNEL. Firenze, Italia 1986.
- G. Miki: "Jet Grouting" VIII Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Moscú, URSS 1973.
- G. Perri: "La Tecnología CCP en el Metro de Caracas" VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Cartagena, Colombia 1987.
- A. Texeira: "Improvement of Soft Clays by Jet Grouting Technology" VIII PCSMFEE. Cartagena, Colombia 1987.
- K. Yanaida: "Flow characteristics of water jets" Osaka Prefectural Technical College, 1973.