

INYECCIONES DE SUELO REQUERIDAS EN
LA ZONA COMPRENDIDA ENTRE LAS
PROGRESIVAS 14+672 A 15+010 DEL
TRAMO LA PAZ-SILENCIO DEL METRO
DE CARACAS

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:

LOPEZ MENDEZ ALEX

QUEVEDO G. JOSE TOMAS

USECHE T. RICARDO ELI

PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL.

CARACAS

1987

TESIS
LQU
87

**INYECCIONES DE SUELO REQUERIDAS EN
LA ZONA COMPRENDIDA ENTRE LAS
PROGRESIVAS 14+672 A 15+010 DEL
TRAMO LA PAZ-SILENCIO DEL METRO
DE CARACAS**

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:
**LOPEZ MENDEZ ALEX
QUEVEDO G. JOSE TOMAS
USECHE T. RICARDO ELI**
PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL.

PROFESOR GUIA: Ing. ANTONIO ATTIAS RODIS

CARACAS 1987

A C T A

El día _____ se reunió el Jurado formado por los Profesores:

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: _____
INYECCIONES DE SUELOS REQUERIDAS EN LA ZONA COMPRENDIDA ENTRE LAS PROGRESIVAS
14 + 672 a 15 + 010 DEL TRAMO LA PAZ - SILENCIO DEL METRO DE CARACAS.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de: INGENIERO CIVIL

Una vez oída la defensa oral que los Bachilleres hicieron de su Trabajo Especial, este Jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACION	
	Número	Letras
LOPEZ MENDEZ, ALEX E.		
QUEVEDO GAVIDIA, JOSE T.		
USECHE TARAZONA, RICARDO E.		

RECOMENDACIONES (Si las hubiera): _____

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, ____ de _____ 1987.

DEDICATORIA.

A MIS PADRES:

Parte de sus esfuerzos y luchas se reflejan en esta formación que me han dado, gracias de todo corazón por su apoyo y entusiasmo que me brindaron para seguir adelante y lograr culminar esta gran meta.

A MIS HERMANOS:

Fieles compañeros, formadores de esa fuerza impulsora estimulante esencial para lograr alcanzar cualquier meta. ESPECIALMENTE a Daniel, que juntos hemos recorrido este duro camino y gracias a Dios que no ha sido en vano. Pues, es por eso que este triunfo es tan tuyo como mío.

A la SANTISIMA TRINIDAD Y AL NAZARENO DE SAN PABLO:

Por la fe que hicieron despertar en mí y que me sirvió en los momentos de angustia y felicidad que sentí durante las etapas cruciales de mi carrera.

ALEX.

DEDICATORIA.

A MIS PADRES Y HERMANOS, quienes me han brindado su apoyo y confianza, -
permitiendo realizarme y llegar a esta meta: LES DEDICO MI ESFUERZO Y TRABAJO.
ESPECIALMENTE a la memoria de mi hermana Angela, que me enseñó la perseveran--
cia y dió fuerza a mis pasos.

A Nonina y al Nono, que con cariño y apoyo me ayudaron a culminar esta -
difícil etapa de mi vida.

A tí ANGELA, la mujer que amo y por quién me he propuesto seguir adelan--
te, por la paciencia y comprensión que me has brindado.

A mis amigos - hermanos que me han acompañado en los momentos difíciles.

JOSE TOMAS.

A G R A D E C I M I E N T O

Es de gran satisfacción, expresar nuestro más sincero agradecimiento a - todas aquellas personas que con su entusiasmo y espíritu de colaboración desinteresado, dedicaron parte de su tiempo en orientarnos en la realización y culminación de este Trabajo Especial de Grado.

Muy especialmente:

Al Profesor Tutor Ing. ANTONIO ATTIAS RODIS, amigo que con tu apoyo y crí ticas constructivas nos diste ánimo para seguir adelante.

A SOLETANCHE DE VENEZUELA C.A., en las personas del Ing. Jean Duchemin, - Ing. Pablo Cormenzana y al Personal Técnico.

A G.C.H. INGENIEROS, en las personas del Ing. Juan Silva, Ing. Gerardo Hernández y al Personal Técnico.

A Belkis Vásquez Sanchez por su colaboración prestada.

A nuestros amigos que directa o indirectamente colaboraron con nosotros.

GLOSARIO.

ABSORCION: Asimilación de fluidos hacia el interior de los intersticios, grietas o hendiduras.

ACUIFERO: Unidad geológica que transporta agua en cantidades significativas.

ADHERENCIA: Emparejamiento o unión de la resistencia de materiales distintos.

ALUVION: Arcilla, arena, grava u otro material rocoso que han sido transportados por corrientes de agua y depositados como sedimentos en épocas geológicas recientes.

BENTONITA: Arcilla compuesta primordialmente por minerales del grupo montmorillonita y caracterizada por su alta adsorción y cambio de volumen.

BOMBEABILIDAD: Es la medida de las propiedades de un mortero en particular; - las cuales determinan seleccionar el equipo de bombeo a utilizar, la forma de ser inyectado el mortero y desde el punto de vista ingenieril las limitaciones objetivas.

CAPACIDAD DE SOPORTE: Unidad máxima de carga que puede sostener el suelo o roca sin que ocurran fallas.

COHESION: Fuerza de atracción de partículas en una masa.

COLOIDE: Sustancia compuesta de partículas finamente divididas, que no se fijan en una solución (No sedimentan).

COMUNICACION: Movimiento bajo la superficie de la mezcla, desde un taladro o perforación que está siendo inyectado hasta otro taladro o abertura sin inyectar.

CREEP: Deformación producida por una carga con el paso del tiempo.

DILATACION: propiedad o tendencia de los suelos granulares para expandirse - cuando están sometidos a un esfuerzo de cizallamiento.

ELASTICIDAD: Propiedad de un material para retornar a su forma y dimensión o-

original luego que cesa la acción o fuerza que las alteró.

FISURA: Es una extensa grieta o fractura en la roca o en el suelo.

FLUIDO NEWTONIANO: En un flujo rectilíneo y paralelo, la viscosidad es constante e independiente del gradiente de velocidad.

FRACTURA: Partidura o quiebre en la masa, que tiende a separarla.

FRAGUADO DEL GEL: Intervalo de tiempo transcurrido entre la mezcla y la formación del gel.

GALERIAS DE RELLENO: Abertura o pasadizo en el interior de una presa utilizado para operaciones de relleno o drenajes, incluso ambas.

GEL: Condición donde un material líquido (lechada) comienza a mostrar consistencia moderada.

INYECTABILIDAD: Capacidad de una formación rocosa o aluvional para aceptar lechadas de inyección.

MANTO DE MEZCLA: Método en el cual zonas muy cercanas y de poca profundidad son perforadas, y sobre una rejilla se rellena el área con la finalidad de elevar las porciones o áreas, fortalecer la capa y disminuir la permeabilidad.

MEZCLADOR CONTINUO: Mezclador dentro del cual los ingredientes de la mezcla están en continuo movimiento sin parar, y desde allí ese producto es descargado constantemente.

PERFORACION ROTATIVA: Proceso de taladrado mediante el cual se logra la perforación del suelo por la rotación de una mecha, la cual desbasta material al estar sometida a presión constante sin necesidad de impactos.

PERFORACION POR PERCUSION: Perforación del suelo por una serie de impactos producidos por la mecha del taladro, por caída libre.

PRUEBA O ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL: Prueba del suelo o roca, en la cual un espécimen cilíndrico tomado como muestra es sometido a presión, y luego cargada axialmente hasta que falle o se rompa.

POROSIDAD: Relación entre el volumen de las cavidades existentes en un material con respecto al volumen total del material (incluyendo el de las cavidades). Usualmente expresado en porcentaje. (n)

PROPORCION DE MEZCLA: Tratandose de mezcla de cemento puro la relación agua - cemento (a/c), proporción de volumen de agua para el cemento seco. La proporción de cemento se toma comunmente como la unidad. Entonces, la mezcla 5:1, - significa 5 pies cúbicos (0.14 m^3) de agua por cada pie cúbico de cemento seco.

PUZOLANAS: Llamadas cenizas de Puzzuoli. Material silíceo-aluminoso, el cual por sí mismo posee muy poco o ningún valor cementoso, pero al dividirlo en partículas muy finas y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos de propiedades cementosas.

SINERESIS: Exudación de líquido (generalmente agua) de un gel que no está sometido a esfuerzos.

SUSPENSION: Mezcla de líquidos y materiales sólidos.

TANQUE AGITADOR: Generalmente vertical y con el tope abierto, con paletas rotativas alternantes, utilizado para evitar la segregación del mortero después de mezclado.

VENTILACION: Perforación hecha para permitir la salida de aire y agua, sirve además para controlar el flujo de mezcla.

VISCOSIDAD: Propiedad que tiene un fluido de resistir a un movimiento interno.

ISOTROPIA: Trata de los cuerpos cuyas propiedades físicas son idénticas en todas las direcciones.

INDICE

Introducción.	1
---------------	---

I. GENERALIDADES.

- METRO DE CARACAS	4
Estudios topográficos	5
Detalles topográficos y servicios públicos	6
Estudios de edificaciones adyacentes	6
Estudios de suelo	6
Estudio preliminar del suelo	7
Estudio definitivo del suelo	7
Pozo y pruebas de bombeo	7
Fosas de ensayo	8
Sistemas de construcción	8
Red básica del metro	11
Tramo La Paz-Silencio	12
Materiales y equipos	13
Resultados esperados con la inyección	13

II. FUNDAMENTO TEORICO.

- Inyección de suelos	15
- Gráfico del cambio de equilibrio del nivel de agua en función del tiempo	19
- Morteros de inyección	21
Principales características de los morteros	21
Preparación de los morteros	25
Clasificación de los morteros	25
Morteros de suspensiones inestables	25
Morteros de suspensiones estables	27
Morteros en estado líquido	35
- Inyección de un medio permeable homogéneo e isotrópico	42
- Inyección de un medio permeable heterogéneo	43
- Dilución de los morteros de inyección que se mezclan con agua	45

- Inyección de un fluido no Newtoniano en una fisura	46
- Inyección de un fluido si Newtoniano en una fisura	47
- Inyección de un mortero en una fisura	49
- Terrenos con flujo de agua	51
Penetración uniforme	51
Teoría del tiempo corto de gelación	56
- Características y posibilidades aproximadas de los principales morteros de inyección	59
- Presión de inyección	60
Presión de inyección para una única fisura	60
Presión de inyección para varias fisuras	60
Algunos factores que intervienen en la escogencia de la presión	62
Fenómeno de contrapresión	62
Control de la presión	63
Consecuencias de la presión alta	63
Influencia del diámetro de las perforaciones	63
Determinación de la presión de inyección para consolidación	64
- Estudio experimental de las inyecciones	64
Ensayos de laboratorio	64
Observaciones in situ	64
Uso de la ENPASOL	65
-Características físicas y mecánicas de los medios inyectados	67
Resistencia a la compresión de una fisura inyectada	68
Resistencia al deslizamiento de una fisura inyectada	70
Resistencia a la rotura de los aluviones inyectados	71
Resistencia al deslizamiento de los aluviones inyectados	72
Permeabilidad después de la inyección	73
Deslavado de los morteros de inyección	74
- Técnica de la inyección	75
Inyección de rocas fisuradas	75
- Inyección de arenas y gravas	76
Inyección de abajo-arriba	76

Inyección con tubos de manguitos	76
Inyección de arriba-abajo	81
Presión de inyección para aluviones	83
- Agrietamientos producidos por la inyección	84
- Deformaciones del subsuelo	85
- Inyección de capas superficiales	86
- Resurgencias	86
- Diámetro de las perforaciones y modo de realizarlas	87
- Control de las inyecciones	87

III. METODOLOGIA ESPECIFICA PARA EL TRAMO

- Finalidad de la inyección	89
- Materiales	90
- Equipos	91
- Metodo de ejecución	92
Control durante el proceso de inyección	93
Eficiencia de la inyección	93
- Estudio del tramo	94
Geología	94
Tratamiento del terreno	94
Forma como se determina el volumen	95
Factores a considerar para la ubicación de las - perforaciones	99
- Análisis de resultados	103
Registros de parámetros antes de la inyección pa- ra el abanico 4120	103
Proceso de inyección para el abanico 4120	107
Registros de parámetros después del tratamiento - para el abanico 4120	122
Determinación del coeficiente de permeabilidad - después de la inyección	129
Registros de parámetros antes de la inyección aba- nico 4180	132
Proceso de inyección	132

Registros de parámetros después del tratamiento abanico 4180	148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
BIBLIOGRAFIA	158

INTRODUCCION

La inyección de suelos es un procedimiento que encierra un conjunto de técnicas cuya finalidad es mejorar las condiciones naturales del terreno: capacidad de soporte e impermeabilidad, de acuerdo a ciertas especificaciones mínimas que permita edificar las obras sin riesgo.

Sus comienzos datan del año 1802 cuando en Francia su inventor Bérigny, inyectó mortero de cemento exitosamente. A éste lo secundaron los ingenieros Mary, Charié, Raynal, Beaudemoulin (1), los cuales pretendieron solamente rellenar oquedades inyectando mortero líquido por gravedad.

Sin embargo, el mayor impulso dado a las inyecciones ocurre en el siglo XX, específicamente en la década de los años veinte, siendo uno de sus impulsores el Profesor Lugeon, quien utilizó un procedimiento capaz de mejorar la estructura de los macizos rocosos, estableció reglas lógicas y flexibles, con las cuales reguló las inyecciones de dichos macizos, pero dejó sin definir las de aluviones de arena y grava.

En aluviones el procedimiento es más complicado, durante muchos años se procedió a inyectar silicato de sodio y luego un reactivo que lo transformaba en gel, a este procedimiento se le denominó Joosten, el cual resultaba muy costoso e ineficaz en arenas finas.

Luego fueron utilizados silicatos de fraguado retardados más penetrantes, cuyo costo aunque menor, aún era limitante.

Años más tardes, en 1938, fué cuando A. Mayer utilizó mortero de arcilla tratada y luego arcilla-cemento que a la postre, hizo que la inyección de aluviones se considerara relativamente barata.

La forma de efectuar la inyección, en sus comienzos se hacía por gravedad, más tarde con los avances tecnológicos se procedió a inyectar a presión, y - en algunos casos se combinan ambos métodos.

En el tramo La Paz-Silencio del Metro de Caracas debido a la características del suelo, predominantemente aluvional, se utilizaron ambas técnicas inyectando un mortero de bentonita-cemento para la consolidación y un gel de silicato de sodio para la impermeabilización, con equipos convencionales.

La composición y dosificación de los materiales inyectados, es determinada previamente por ensayos de laboratorio con la ayuda de los registros de parámetros, obtenidos con un novedoso sistema computarizado, que permite conocer la estructura del suelo sin extracción de núcleo (Capítulo III).

Cabe destacar que debido a la ubicación del tramo, en el casco central de la ciudad, y al alto volumen de circulación de vehículos, fué necesario reducir al mínimo la zona de trabajo; esto se logró mediante la utilización de "Abanicos de Inyección": Planos perpendiculares al eje del túnel, con una separación determinada y aprobada en base a reconocimiento geológico, constituido por una serie de taladros o perforaciones con distintas inclinaciones.

Las inyecciones a nivel mundial han tenido resultados satisfactorios por lo que su estudio y aplicación ha adquirido gran auge en los últimos años.

El tramo la Paz-Silencio del Metro de Caracas no es la excepción del caso, -
por el contrario los resultados obtenidos comprueban una vez más la efectivid
dad de las mismas.

CAPITULO I
GENERALIDADES.

METRO DE CARACAS.

Los antecedentes más antiguos del Metro de Caracas datan de 1947, cuando se comenzó a considerar la idea de un sistema de transporte rápido para Caracas. En 1959 la Gobernación del Distrito Federal designó una Comisión integrada por destacados ingenieros venezolanos y un asesor internacional para hacer un estudio de los sistemas de transporte masivo y su posible aplicación a Caracas. Posteriormente en el año 1961, una misión de las Naciones Unidas, a petición del Gobierno Nacional estudió el problema de transporte en Caracas y recomendó la construcción de una línea de transporte rápido desde Catia (en el Oeste de la Ciudad) hasta Petare (extremo Este). Cuatro años después, en 1965, se estableció la Oficina Ministerial de Transporte adscrita al Ministerio de Obras Públicas, con el propósito de realizar un estudio exhaustivo del transporte terrestre y de investigar la factibilidad técnica, económica y financiera de un sistema de transporte rápido para el área Metropolitana de Caracas.

A partir de 1968 se inició el proyecto de ingeniería de la primera línea desde Catia hasta Petare, y paralelamente se realizaron los estudios económicos, se formuló el plan de financiamiento y se acometieron los estudios y proyectos de leyes que se consideraron imprescindibles para su ordenamiento legal e institucional.

A principio de 1972, se inició la construcción del tramo superficial desde Agua Salud hasta Caño Amarillo y la estación Agua Salud a finales de 1973.

En 1975 se decidió comenzar la construcción de las obras subterráneas del Metro de Caracas y se procedió de inmediato a las Licitaciones de las Obras Civiles, iniciándose la construcción un año después.

Como parte del Ordenamiento Legal e Institucional antes referido, el Poder ejecutivo acordó en 1977 la creación de una empresa del Estado caracterizada por su facultad ejecutiva, la cual se inscribió en el Registro Mercantil el 8 de Agosto de 1977 con el nombre C.A. METRO DE CARACAS (CAMETRO).

En 1978, después de un laborioso proceso de selección se otorga la Buena Pro para la fabricación del Sistema Integral, que comprende material rodante, vías férreas, control de trenes y electrificación para tracción.

Es el 2 de Enero de 1983, cuando es inaugurado oficialmente el Metro de Caracas por el Presidente de la República en el tramo comprendido entre Propatria hasta La Hoyada, posteriormente el 27 de Marzo del mismo año se puso en servicio el tramo hasta Chacaíto (2).

ESTUDIOS TOPOGRAFICOS.

En todas sus fases, la elaboración del proyecto de Obras Civiles del Metro exige la realización de una serie de estudios básicos de topografía a lo largo de la ruta, en una franja de aproximadamente 150 metros, comenzando con el replanteo de una poligonal de control que sirve de apoyo a los levantamientos topográficos efectuados posteriormente por procedimientos aerofotogramétricos y terrestres. La información recabada se representa en planos apropiados, los cuales varían en función de la utilidad que vayan a tener dentro

de las distintas fases y especialidades del proyecto (3).

DETALLES TOPOGRAFICOS Y SERVICIOS PUBLICOS.

Con el objeto de precisar la ubicación de aquellas instalaciones afectadas en alguna forma por el proceso de construcción, cuando el levantamiento aéreo no basta para determinarla, se complementa con el levantamiento terrestre, apoyado en la poligonal de control. Tales instalaciones incluyen los servicios de electricidad, tuberías de aguas blancas y de aguas negras, gas, teléfono, así como, los pasos peatonales subterráneos, quebradas, puentes y otros obstáculos (3).

ESTUDIOS DE EDIFICACIONES ADYACENTES.

Durante los estudios preliminares de trazados, se identifican las características estructurales de las edificaciones cercanas, con el fin de conocer los problemas que plantean las distintas alternativas de trazado de las rutas y los métodos de construcción. Los estudios de las edificaciones adyacentes continúan durante la preparación del anteproyecto y del proyecto, mediante aproximaciones que permiten ir profundizando en los resultados mientras se va decidiendo sobre la línea y sus características definitivas (3)

ESTUDIOS DE SUELOS.

La determinación de la influencia del suelo sobre las estructuras del Metro y viceversa, así como de las probabilidades de deformación en las edificaciones cercanas exigen realizar un programa de estudios de suelos. Dicho programa

se desarrolla en dos etapas, una preliminar y otra definitiva.

Estudio preliminar del suelo:

Una vez que se determina las alternativas en la fase del anteproyecto, se hace un estudio preliminar del suelo con el objeto de detectar sus problemas potenciales, y para programar mejor el estudio definitivo de los mismos. Esto consiste en la realización de sondeos de aproximadamente 30 metros de profundidad cada 200 metros, a lo largo del corredor, obteniendo las muestras necesarias para indicar las características del suelo según la profundidad de la perforación, así como también el nivel freático.

Estudio definitivo del suelo:

Consiste en una investigación detallada del subsuelo en cada uno de los tramos del Metro. Se comienza realizando perforaciones de 63.5 mm de diámetro para tomar muestras perturbadas, y de 114.3 mm para muestras no perturbadas. En base a estas perforaciones se elabora gráficamente un perfil geológico y se hacen recomendaciones específicas de acuerdo a los resultados de los ensayos (3).

POZOS Y PRUEBAS DE BOMBEO.

A fin de estudiar el comportamiento del agua subterránea, cuyo conocimiento es determinante tanto para el proyecto como para la construcción, se efectúan estudios de permeabilidad por medio de pozos y de otras perforaciones alrededor de ellos, midiendo la velocidad con que el agua se mueve en el subsuelo.

FOSAS DE ENSAYO.

Para complementar los estudios antes mencionados y apreciar mejor en el sitio las características del suelo, se construyen fosas de ensayo de dos por tres metros de sección y de aproximadamente veinte metros de profundidad. La información adicional obtenida proporciona muestras grandes no perturbadas que indican las características del subsuelo y el comportamiento del mismo a diferentes profundidades, además de permitir la realización de ensayos de laboratorio.

SISTEMAS DE CONSTRUCCION (2).

La construcción de los TRAMOS A NIVEL, es quizás el método más sencillo, pues sólo exige un movimiento de tierra que permita lograr una base adecuada para tender la vía férrea sobre balasto. Es un tipo de construcción similar al que se usa para los ferrocarriles convencionales.

La construcción de los TRAMOS ELEVADOS también es sencilla, pues se colocan vigas maestras sobre columnas que mediante vigas longitudinales prefabricadas sostiene la estructura de la vía y de las estaciones. Generalmente se utilizan monocolumnas espaciadas cada veinte o veinticinco metros (en las estaciones la distancia entre columnas esta determinada por el diseño de cada una).

Cuando la ruta del Metro debe pasar a un nivel inferior que el nivel de la superficie y el espacio superior no tiene que ser aprovechado para otros usos, se utilizan TRINCHERAS, que consisten en una excavación en la cual las

paredes de las mismas son sostenidas y protegidas de derrumbe por un sistema de entibado especialmente diseñado para cada caso.

La TRINCHERA cuando es ABIERTA inutiliza, para efectos del tránsito, la franja excavada, durante el período de construcción. Este tipo de trinchera es usada generalmente en parques, plazas, zonas verdes, y calles de poca circulación de vehículos.

Cuando el volumen de tráfico sea considerable, se podrá usar lo que se conoce como TRINCHERA CUBIERTA, que no es más que la misma trinchera anterior a la cual se le coloca un puente provisional para no interrumpir el tránsito en el sector.

La utilización de trincheras abiertas o cubiertas no causan interferencias al funcionamiento de los servicios públicos (agua, luz, gas, teléfono) y que los mismos serán protegidos y sostenidos de la estructura del entibado o del puente provisional.

El sistema del "MURO DE BERLIN" es generalmente utilizado cuando cerca de las excavaciones no existen edificaciones importantes. Consiste en la colocación de una serie de pilotes a cada lado y a lo largo de los límites de la trinchera, iniciando luego la excavación; conforme ésta se profundiza, se coloca un revestimiento de madera o concreto a cada lado de la trinchera, apoyándose en los pilotes para proporcionar soporte lateral al conjunto mediante anclajes o puntales.

TUNELES: En algunos sectores de la ciudad y debido a condiciones especia

les, el diseño indica la utilización de túneles. Estos son clasificados de acuerdo a los materiales que ellos atraviesan. Básicamente existen dos tipos:

A- TUNELES EN ROCA.

B- TUNELES EN SUELO.

Debido a las condiciones geológicas del Valle de Caracas, el segundo tipo será el más utilizado.

Los túneles en suelo pueden ser de HERRADURA ó CIRCULARES. Los túneles en herradura se usan para alojar a las dos vías en ambas direcciones, se utilizan en arcillas duras y medianamente duras. Para construirlos se perforan primero dos túneles laterales, dentro de los cuales se construyen las fundaciones de la herradura que luego sirven de guía al topo utilizado en una segunda etapa para la perforación de la totalidad del túnel.

Los túneles circulares serán usados principalmente en suelos blandos. Para perforar este tipo de túnel se requiere una maquinaria especial llamada ESCUDO (popularmente "topos"), los cuales cavan el suelo blando y mediante una correa transportadora llevan el material excavado hasta las carretillas utilizadas para botar los escombros. El escudo sostiene el frente de trabajo mientras coloca en la cola el revestimiento de concreto armado del túnel recién perforado. Los topos son una maquinaria compleja, de cerca de ochenta metros de largo. A fin de mantener la correcta alineación horizontal y vertical de la máquina, su curso se ajusta para que coincida exactamente con la trayectoria de un rayo láser que establece la dirección y el perfil del túnel. Tienen la ventaja de que en su avance, van recubriendo el túnel con segmentos prefabricados de concreto armado, de esta manera van dejando el túnel listo, evitando toda posibilidad de derrumbes.

Los anillos prefabricados de concreto armado están construidos por segmentos unidos con pernos en sus extremos radiales, que forman así los anillos.- Todas las juntas llevan empacaduras de neoprene y son calafateadas para lograr impermeabilidad. Los accesorios de tuberías instalados a través de los segmentos, permiten inyectar una lechada de cemento en la angosta cavidad restante entre el revestimiento y la tierra.

La excavación de túneles es más costosa que cualquier otro método, pero su uso queda justificado en zonas críticas de la ciudad en las cuales no es posible cerrar el tránsito ni siquiera temporalmente.

RED BASICA DEL METRO.

La configuración de la red del Metro coincide en general con los ejes del Valle, a lo largo de los cuales se encuentran los corredores más densamente poblados. Las pocas avenidas que tienen continuidad en la ciudad constituyen las espinas dorsales de estos corredores y dan servicio a los mayores volúmenes de tránsito siendo las rutas del transporte.

Tres líneas constituyen la red principal del Metro: La Línea Propatria-Palo Verde (Línea 1) que atraviesa la ciudad de Oeste a Este; la Línea Caricuao-Silencio (Línea 2) que va del Suroeste al Centro, y la Línea La Rinconada-Centro (Línea 3) que va del Sureste al Centro, con un ramal hacia la Plaza Venezuela.

LÍNEA CARICUAO-SILENCIO.

Contará con un total de trece estaciones construidas a diferentes niveles

según el trazado de la línea, la cual será principalmente elevada (6.4 Km) en su tramo Sur; en trincheras poco profundas, abiertas y/o cubiertas (7.4 Km) - en su tramo Central, y en túneles (5.5. Km) en su tramo Norte; con un posible ramal hacia el Este en el sector Sur del casco Central, tentativamente propuesto con cuatro estaciones. El extremo Sur de la línea comprende dos ramales, de los cuales uno de 4.5 Km de longitud, trazado hacia el Suroeste con partes elevadas y otras a nivel. El otro ramal hacia el Este, elevado y con una - longitud de 3.0 Km servirá a la Urbanización Caricua con dos estaciones. - Este último ramal cruza sobre el Guaire para unirse con el otro ramal. De - allí la línea continúa a nivel hacia el Noroeste por el lado Oeste de la Au- topista Francisco Fajardo, pasando por Antímano. En este tramo hay dos esta- ciones.

Desde allí la línea linda con la Avenida Intercomunal de Antímano en trinchera cubierta hasta pasar por la Zona Industrial de la Yaguara. Luego la - línea gira hacia el Este en forma subterránea para permitir la construcción de la Estación La Paz. La línea dobla de nuevo, a fin de terminar la Estación Silencio ubicada al Sur de la Estación Capitolio de la Línea 1, las cuales - estarán conectadas por medio de un paso peatonal subterráneo para facilitar los trasbordos entre ambas. Las otras estaciones en este tramo son Artigas, Ma- ternidad y Capuchinos, todas subterráneas al igual que la Estación Silencio.

TRAMO LA PAZ-SILENCIO.

Características del suelo.

Se encontró en este sector, suelos básicamente arenosos con marcada pre--sencia de limo y material arcilloso, así como un conjunto de peñones ubicados

en algunas zonas sobre una capa de esquisto, todo esto bañado por una capa freática de altura variable.

Materiales y Equipos.

Los materiales utilizados son morteros de bentonita-cemento, gel de silicato de sodio con un reactivo orgánico y agua potable suministrada por el Instituto Nacional de Obras Sanitarias.

En cuanto a los equipos se utiliza:

- a.- Sistema de inyección con capacidad para un caudal de 10 litros por minuto.
- b.- Depósito de agua con mezcladores y capacidad suficiente para un bombeo continuo.
- c.- Balanzas y medidores para una determinación exacta de las proporciones de los componentes.
- d.- Manómetros, obturadores, tubos de P.V.C. y mangueras.
- e.- Perforadoras con brocas de diamante industrial, tricónicas.
- f.- Enpasol Digital: Aparato electrónico (figura I-1) usado para la grabación y almacenamiento de los parámetros de perforación.
- g.- Computadora que procesa los datos de la Enpasol (figura I-2).

RESULTADOS ESPERADOS CON LA INYECCION.

Para posibilitar la excavación del túnel con mayor seguridad, eficacia y economía, es necesario tratar el suelo de modo adecuado antes de empezar -

la excavación propiamente dicha.

El tratamiento previsto se compone de inyecciones de lechada bentonita-cemento y de gel de silicato, realizadas desde la superficie.

Las inyecciones tienen por finalidad reducir la permeabilidad y consolidar el suelo de tal modo que posibilite la excavación del túnel.

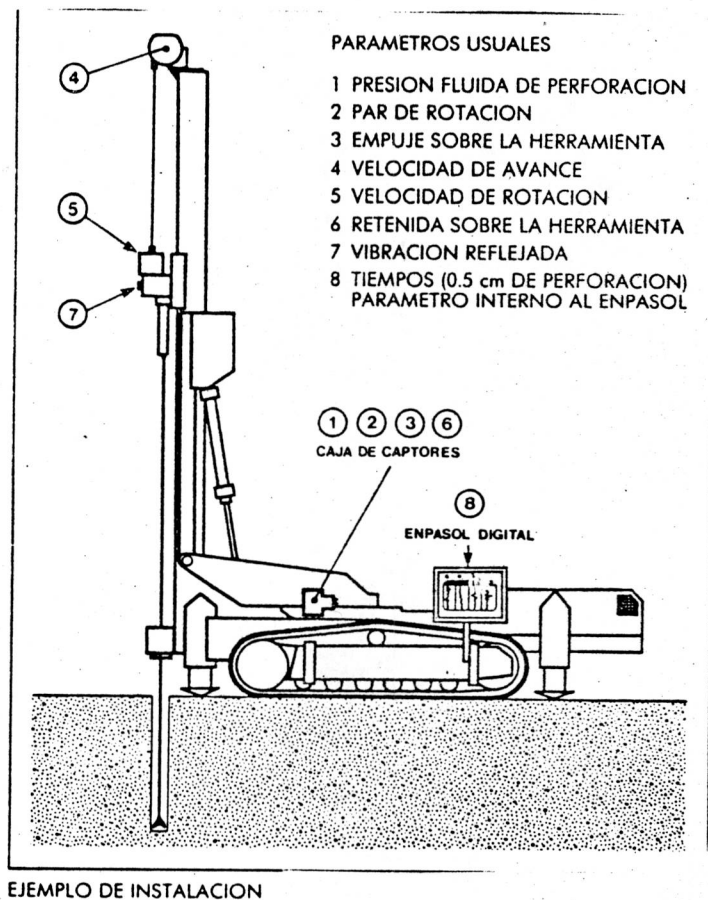


Figura I-1.

INTRODUCCION
DE UNA CINTA DE GRABACION

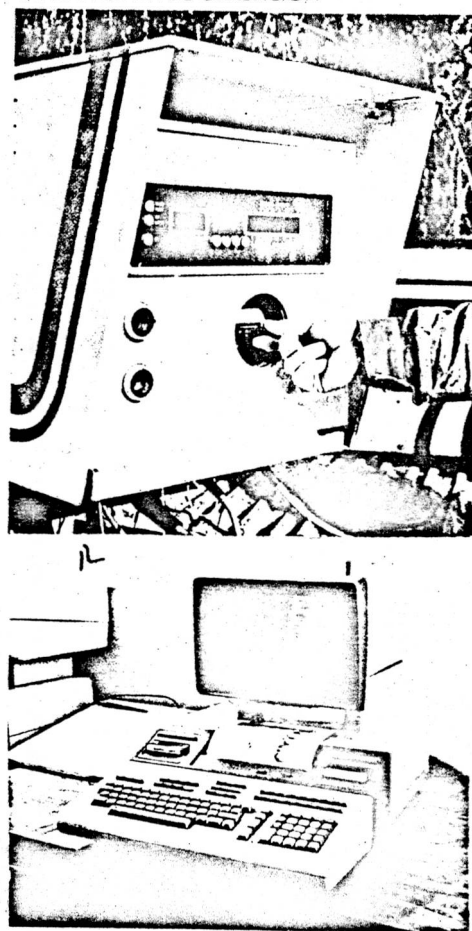


Figura I-2.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO.

INYECCION DE SUELOS.

Como se sabe, en el campo de la ingeniería, el suelo es fundamental en el desarrollo y construcción de las obras civiles, sin embargo, en muchos casos éste no reúne las condiciones necesarias para soportar las sollicitaciones - a que son sometidos durante la ejecución y vida útil de la obra.

Dependiendo del tipo de obra y de las condiciones naturales del terreno - se selecciona el tratamiento que mejor se adapte a los requerimientos exigidos.

Una posible solución a este problema, es la inyección de suelos, la cual es objeto del presente estudio.

La inyección de suelos consiste en la elaboración y colocación en el terreno de un mortero o lechada de características específicas, a través de perforaciones, cuya profundidad y separación dependen del tipo y magnitud de la obra, así como, de las características del suelo y de la lechada.

Este mortero es colocado por gravedad y/o por presión utilizando para ello un equipo especial que permita regularla, de modo tal, que no ocasione fuertes deformaciones del subsuelo que pudieran afectar las estructuras existentes en las cercanías de la zona de inyección u ocasionar problemas en el suelo inyectado.

Es necesario inyectar los suelos que poseen características de permeabili-

dad y porosidad altas, así como aquellos que presentan poca resistencia, tales como: Rocas fisuradas, arenas, gravas y aluviones.

Los espacios o huecos a rellenar son diferentes en cada tipo de suelo y - dependiendo del caso puede variar el tipo de mortero y el método de inyección a usar.

En el caso de suelos sueltos y debido a la variedad de tamaños alternos - de los espacios vacíos, después de varios intentos y ensayos se obtuvo una - solución económica para inyecciones en aluvión mucho después que el de rocas fisuradas.

Una característica de los aluviones es la heterogeneidad que se manifiesta por una superposición de capas de distinta granulometría conformadas por arenas y grava. Es a esta característica que se debe la morfología irregular de los poros. Dicha heterogeneidad debe conocerse para elaborar un proyecto económico de inyecciones, este reconocimiento se hace mediante un método sencillo que consiste en acoplar a una perforación de reconocimiento un tubo con agujeros en toda su longitud, en forma de colador; luego se bombea agua que se distribuye proporcionalmente a la permeabilidad de cada capa, por lo cual es necesario medir las variaciones de caudal o la velocidad del agua en el tubo, lo cual se logra desplazando un molinete (patente SOLETANCHE) - dentro del mismo.

La comparación de las medidas realizadas entre caudales de bombeo constantes y nulos permite localizar las diferentes capas del subsuelo y definir la composición del mortero en función de la permeabilidad real de cada zona a tratar, así como los volúmenes afectados por el mortero. Es de hacer notar

que siempre hay que tener presente que el reconocimiento sea hecho sin interrupciones.

La permeabilidad del suelo se determina con el denominado "Ensayo LEFRANC" el cual consta de dos fases: Una fase preparatoria donde se delimita la "bolsa de ensayo", cavidad de forma geométrica simple realizada en el terreno objeto de estudio y de pequeñas dimensiones en relación al espesor de la capa permeable.

La segunda fase de medida de la permeabilidad se realiza mediante el cálculo de la velocidad de descenso de la columna de agua sobre la bolsa de ensayo (figura II-1).

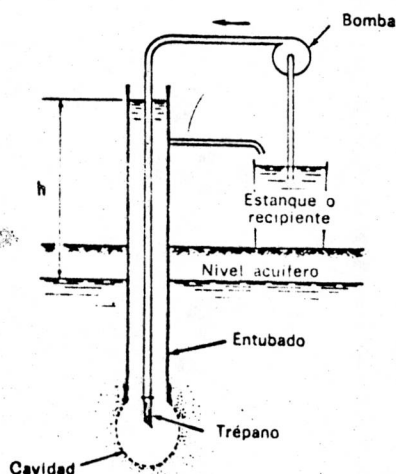


figura II-1. Montaje LEFRANC para ensayos de agua.
(Ref.: Inyección de Suelos. H. Carbefort)

Para esto se utiliza la ecuación general de escurrimiento de un fluido en un medio permeable:

$$Q = C \times K \times h$$

donde:

K: Define completamente las características hidráulicas del medio, lo cual hace que se exprese con dimensiones de velocidad y viene siendo el caudal de percolación por unidad de sección para un gradiente hidráulico unitario, calculada mediante la ecuación:

$$K = \frac{k \times \bar{w} \times g}{\mu}$$

siendo:

k = permeabilidad intrínseca que depende solamente de la estructura del medio y del diámetro de los granos expresados en centímetros
($k < d^2 / 700$)

\bar{w} = peso específico del fluido (T/m^3)

g = aceleración de gravedad (m/seg)

μ = viscosidad dinámica (poises)

d = diámetro de los granos (cm)

h: Es la carga que provoca el escurrimiento expresada en altura del flujo (metros).

C: Factor que depende de las dimensiones de la bolsa de ensayo, y se determina usando las siguientes ecuaciones:

Quando $l > D$

$$C = \frac{2 \times \pi \times l}{2,3026 \log \frac{1}{0,67957 \times D}}$$

Quando $l \approx D$

$$C = \frac{2 \times \pi \times D \times \sqrt{(l^2/D^2) - 1}}{2,3026 \log (1/D + \sqrt{(l^2/D^2) - 1})}$$

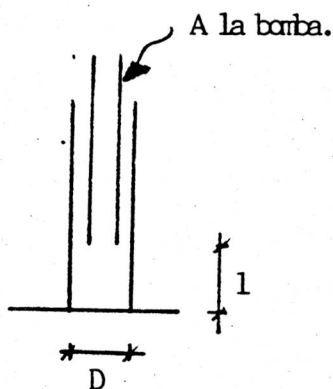
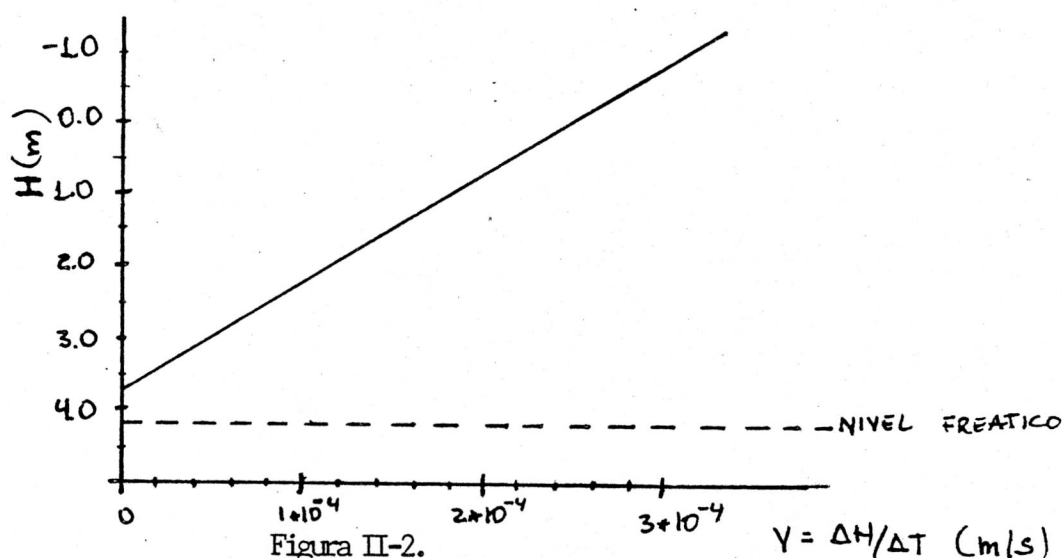


Gráfico del cambio de equilibrio del nivel de agua en función del tiempo.

Es un método gráfico que permite determinar la permeabilidad del terreno. Para ello se realiza un gráfico (figura II-2) con $\Delta H/\Delta T$ en abscisas y H en ordenadas, siendo H la profundidad en metros y $\Delta H/\Delta T$ en metros por segundo, representando la velocidad.



Para que este método funcione satisfactoriamente se utilizan las siguientes fórmulas, estableciendo la diferencia entre medidas no consecutivas, pues es necesario que $\Delta H/\Delta T$ sea pequeño; pero por otra parte, si fuera muy pequeño, el error cometido en cada medida tendría gran importancia relativa. Las fórmulas son:

$$(\Delta H / \Delta T)_i = (h_{i+j} - h_i) / (t_{i+j} - t_i)$$

$$H_i = (h_{i+j} - h_i) / 2$$

donde:

h_i y h_{i+j} es profundidad en metros del agua por sobre el nivel estático en el momento t_i y t_{i+j} respectivamente.

H_i : Promedio entre dos valores no consecutivos.

Una vez hecha la gráfica (figura II-2) se determina la pendiente de la curva y se establece la ecuación de las variaciones de los niveles.

En el instante dt , el agua entra en la bolsa de ensayo con la carga H y por tanto el nivel sube dH en el tubo, se obtiene entonces:

$$Q = C \times K \times H = - S \times \frac{dH}{dt}$$

donde:

H : Altura de agua por encima del nivel estático en el momento t .

dH : Variación de altura en el tiempo dt .

S : Sección libre de la columna (sección interna del pozo restando todos los cuerpos que puedan encontrarse dentro del mismo).

La ecuación puede presentarse como sigue:

$$\frac{dH}{dt} = C \times K \times H / S$$

Considerando, C , S y K constantes en el curso de un mismo ensayo, se obtiene una representación lineal de la cual, la pendiente será $S / C \times K$, mientras el escurrimiento se mantenga laminar.

Del gráfico (figura II-2) se obtiene una recta de pendiente:

$$p = \frac{H}{\frac{dH}{dt}} = - S / C \times K$$

de donde:

$$K = - S / C \times p$$

MORTEROS DE INYECCION.

Los morteros, conocidos también como lechadas, son mezclas de materiales muy específicos que varían de acuerdo al tratamiento que se va a realizar: pueden ser usadas tanto para impermeabilizar como para consolidar. Tienen como objetivo fundamental, llenar las fisuras, cavidades o intersticios del medio a tratar, para así aumentar la capacidad de carga del mismo, o simplemente para dar mayor estanqueidad a la zona. Para ello los productos inyectados en su estado final, deben presentarse en forma sólida y tener capacidad para soportar las presiones hidrostáticas a las cuales estará sometido, la acción de aguas agresivas y además poseer buena resistencia mecánica.

El proceso de inyección requiere, para facilitar la penetración, que la lechada sea de poca viscosidad y principalmente de poca rigidez. Con estas condiciones se logra mayor radio de acción, menor tiempo en el proceso de inyectado, menor número de perforaciones y por ende el costo total de la operación no se eleve por encima del valor justo. Para esto, es preciso saber elegir la mezcla en función del terreno, del objetivo, economía de los trabajos y de la magnitud de la obra. Esto se dificulta debido a que no existen muchos productos que cumplan los requerimientos y aún más cuando la mayoría de estos son muy costosos.

Principales características de los morteros.

Para determinar las proporciones exactas de los productos que intervienen en la composición de los morteros, es necesario estudiar sus propiedades en laboratorio. Este estudio está orientado hacia el conocimiento de una serie de medidas tales como resistencia a la rotura, retracción, permeabili

dad, etc.

La resistencia a la rotura es importante en anclajes y en algunas consolidaciones; pero aún en estos casos no se requieren valores muy altos, ya que el mortero se deposita en forma de láminas que pueden soportar esfuerzos considerables sin ser destruídos. En los morteros usados para impermeabilizar, la resistencia puede ser prácticamente nula, aunque es necesaria cierta rigidez, para evitar que al cabo de varios años sea desplazado por la presión de agua.

La permeabilidad es una medida que se hace solamente para reconocimiento inicial del mortero una vez determinada la naturaleza de éste.

En cuanto a la retracción, ésta es despreciable porque la lechada inyectada sólo forma láminas delgadas rellenas de fisuras o masas que están confinadas por un esqueleto bastante rígido. Además, por lo general las inyecciones están en contacto con el agua del suelo por lo cual es muy difícil que se produzca la retracción.

Otras medidas importantes a considerar son viscosidad, rigidez y rezumo. Para realizarlas pueden usarse aparatos muy sofisticados o bastante sencillos y de fácil manejo; aunque estos últimos no den resultados que puedan asociarse a magnitudes físicas, pero esto no implica mayor problema, la medida obtenida en campo está más cerca de la realidad que la de laboratorio.

Para la viscosidad se pueden usar viscosímetros de circulación o de cilindros coaxiales. Este último permite separar la viscosidad y la rigidez de un fluido plástico y calcula la tixotropía de un mortero.

Los viscosímetros de circulación son conos calibrados en los cuales la medida se hace anotando el tiempo de circulación de un volumen de mortero dado. El resultado depende a la vez de la viscosidad, de la rigidez y de la densidad del mortero. Existen tres tipos de conos, los cuales varían uno del otro en cuanto a sus dimensiones, y son utilizados según la consistencia de la lechada; a saber:

- a.- Tipo MARSH: Se usa para lodos de perforación. El apéndice inferior tiene cinco milímetros de diámetro y ciento cincuenta y cinco milímetros el diámetro superior, la capacidad es de 1.5 litros.
- b.- Tipo MECASOL: Apéndice de ocho milímetros, diámetro superior ciento ochenta y cinco milímetros y capacidad para 1 litro.
- c.- Tipo PREPACK: Apéndice de catorce milímetros, diámetro superior ciento setenta y ocho milímetros y capacidad para 1 litro.

Los resultados de cada uno de los conos no se corresponden directamente, por eso, en la obra debe utilizarse un sólo tipo, para obtener así, valores comparables que puedan relacionarse.

Medida de la rigidez:

La rigidez de un mortero es lo que se opone a la inyección. Se mide con el viscosímetro de STORMER y el de cilindros coaxiales, también con un rigímetro conocido como "BOURCART-FLORENTIN-ROMANOWSKY", aparato delicado pero sencillo, formado por un cuerpo cilíndrico, hueco, tarado en el que se puede medir la profundidad de asiento o hundimiento del mortero; en el resultado interviene la densidad del mortero por lo que debe conocerse con precisión. La viscosidad de una suspensión está comprendida entre 0.8 y 1.5 poises, y

su rigidez entre 60 y 150 dinas por centímetros cuadrados.

Medida del agua rezumada:

Se define como "Rezumo" al ascenso del agua que se produce en la superficie de una suspensión debido a la sedimentación de las partículas.

El ensayo se realiza con cualquier recipiente destinado para morteros espesos, para ello, de vez en cuando se inclina el recipiente para eliminar el agua que aparece y luego se pesa. En el caso de morteros muy fluidos, es conveniente utilizar una probeta y se anota la altura de agua rezumada en un tiempo determinado. En este ensayo se evalúa la rigidez y la tixotropía de la suspensión.

Influencia de la sedimentación:

La sedimentación influye en la permeabilidad intrínseca del mortero inyectado y por ende en la del terreno. En los intersticios se presentan pequeñas fisuras llenas de agua, debido a la sedimentación, estas fisuras permiten cierta circulación de agua, pero las arenas y gravas inyectadas tienen una permeabilidad residual tan baja que hace el trabajo satisfactorio.

La sedimentación provoca un aumento de la rigidez por la disminución de agua de la fase sólida. Esta baja de agua antes y después del fraguado, está comprendida entre 10% y 30%. Entonces, el coeficiente de relleno de espacios vacíos del suelo estará, después del fraguado, en el orden de 70% y 90%. La diferencia estriba en la naturaleza del mortero y en la granulometría del terreno.

Preparación de los morteros:

Los morteros tienen características diferentes según sea el orden de mezclado y aún más, sí alguno de ellos admite coloides. Por ello, en la obra, el trabajo operativo se debe seguir estrictamente como fué establecido en el laboratorio. Cabe destacar, que el comportamiento de la bentonita es totalmente diferente según se utilice inmediatamente después de diluída o se espere varios días. En este último caso, las partículas tienen tiempo suficiente para saturarse de agua.

Los morteros que contienen a la vez arcilla y arena, conviene añadirlos al mismo tiempo, ya que así se evita la formación de grumos, y a la vez se reduce el tiempo de agitación para obtener un mortero homogéneo.

CLASIFICACION DE LOS MORTEROS.

Se clasifican en tres categorías, a saber:

- Morteros de Suspensión Inestables.
- Morteros de Suspensión Estable.
- Morteros en Estado Líquido.

Morteros de Suspensiones Inestables:

Son suspensiones en agua, de cemento o piedra molida, no son mezclas homogéneas ya que cuando finaliza la agitación, comienza la sedimentación.

Experimentos realizados, han demostrado que por debajo de cierta velocidad los granos se depositan y obstruyen rápidamente todo el conducto, forman

do bóvedas en la entrada de los intersticios que disminuyen el radio de acción de la inyección. Esto puede mejorarse un poco con mezclas más diluídas, por ejemplo con la relación agua cemento (a / c) 10:1.

Es condición necesaria pero no suficiente, que los granos de cemento sean menores que la menor dimensión de los espacios vacíos de la arena para que la inyección sea posible.

Otra condición que se debe satisfacer es, que la velocidad de la corriente esté por encima de la celeridad a la cual el cemento puede depositarse. Los conductos de mayor sección se obstruyen rápidamente porque la velocidad de los morteros es menor. Este fenómeno es el que permite la inyección de fisuras en los macizos rocosos. Pero en arenas ocurre todo lo contrario, porque cuando el mortero pasa de un intersticio pequeño a otro más grande, su velocidad disminuye. Si ésta disminución es tal, que permita que el cemento se deposite, el intersticio grande se tapona por lo menos parcialmente. Estos depósitos son arrastrados por la presión de la corriente y terminan por obstruir el pequeño intersticio siguiente, interrumpiendo así el proceso de inyección.

El prototipo de mortero inestable es el de cemento, con la condición de que éste se encuentre suficientemente diluído. El límite de la dilución no se puede precisar, porque depende de la naturaleza del cemento. No es raro encontrar morteros con una relación a / c igual a 10:1; por lo que es necesario conocer el comportamiento del cemento, principalmente el fraguado y su resistencia mecánica final.

MORTEROS DE SUSPENSIONES ESTABLES.

Son suspensiones en el agua, de granos suficientemente pequeños para que no ocurra sedimentación durante la inyección.

Una suspensión de arcilla coloidal mientras no sedimente, pertenece a éste tipo de mortero, pero siempre que mantenga la fluidez necesaria para hacer posible la inyección y proporcione posteriormente la rigidez suficiente. Estas propiedades son difíciles de obtener; se alcanza con métodos de fabricación que asegure la desfloculación de los coloides o por adición de éstos a productos más bastos. Por este motivo el mortero adquiere una cierta rigidez que favorece la suspensión de cemento y arena que eventualmente se le puede añadir.

Tipos de morteros estables.

- a.- Mortero Cemento Bentonita (B/C): Como se puede observar en las figuras II-3 y II-4, la adición de bentonita aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte de los morteros de cemento en los que la relación a/c sea constante (4). Este aumento es más sensible cuanto más denso sean los morteros iniciales.

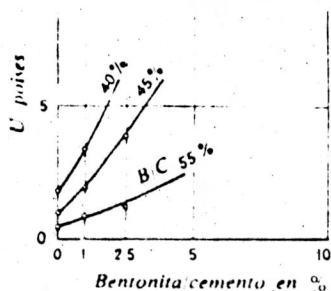


FIGURA II-3. Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad (Ref. Inyección de suelos. H. Carbefort)

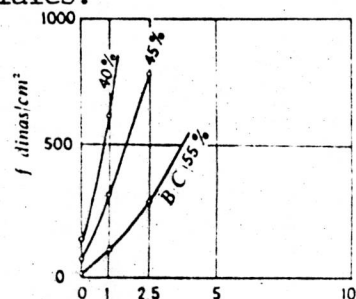


FIGURA II-4. Influencia del porcentaje de bentonita en el límite de resistencia al corte. (Ref. Inyección de suelos. H. Carbefort)

Cuando se comparan morteros con igual decantación, se observa que la adición de bentonita disminuye la viscosidad del mortero y, la resistencia al corte pasa por mínimo. Esto se explica, las dispersiones de bentonita aunque muy diluídas presentan cierta rigidez, por lo tanto, para estabilizar los morteros de cemento es suficiente con pequeñas dosis de bentonita, ya que así se logra un aumento rápido de la rigidez.

La dosificación de bentonita depende de su calidad, por ejemplo, 4% de una bentonita cuyo límite líquido sea 300% es más o menos equivalente al 2% de una bentonita de límite líquido 550%, con un cemento portland normal.

Se puede concluir que la adición de una pequeña cantidad de bentonita al cemento, permite realizar morteros inyectable que presentan una buena resistencia mecánica, pero que sin embargo es inferior a la que presentan los morteros de cemento activados.

b.- Morteros de cemento-silicato: La adición de silicato de sodio al mortero de cemento, aumenta la rigidez de éste, el incremento de la misma es mayor en cuanto sea más fuerte la dosificación del cemento. Ello ocurre por la aceleración del fraguado debido al silicato de sodio.

Uno de los inconvenientes que presentan estos morteros, es que no son homogéneos y tienden a la formación de grumos, lo que provoca tiempos muy largos de agitación, incompatibles con las necesidades del trabajo.

c.- Mortero de cemento-bentonita-silicato: La adición de bentonita a un mortero de cemento retarda su fraguado y disminuye su resistencia mecánica,-

pero produce un mortero homogéneo y eventualmente tixotrópico. En cambio el silicato acelera el fraguado pero proporciona morteros grumosos.

Entonces, es conveniente mezclar estos productos (5), obteniéndose así un mortero homogéneo, con una rigidez inicial mayor que la obtenida únicamente con la bentonita, además de un comportamiento claramente tixotrópico y resistencias mecánicas relativamente elevadas.

d.- Morteros de cementos activados: La finalidad de la activación es de obtener morteros inyectables con elevadas dosis de cemento y, sedimentación muy baja o nula. Además se hace menos deslavable y prácticamente no miscible en el agua.

Un mortero de cemento dosificado (a/c) entre 1/2 y 1/2.3 aproximadamente, según el tipo de cemento, está en el límite de la inyectabilidad.

Para aumentar la dosis de cemento manteniendo la inyectabilidad, es necesario usar procedimientos que nos permitan una mejor dispersión del cemento. Esta dispersión se puede lograr mediante tres métodos:

d.1.- Dispersión química.

d.2.- Dispersión física.

d.3.- Dispersión mecánica.

d.1.- Dispersión química: Permite obtener morteros de dosificación relativamente pequeña y sedimentación nula, para lo cual se le añaden algunas centésimas de su peso, de uno o varios productos coadyuvantes, convenientemente escogidos, tales como: Plastificantes, expansivos, etc.

Los plastificantes actúan como desfloculantes; la adición de éstos no modifica la viscosidad; en cambio reduce considerablemente la rigidez(4).

En general, estos productos coadyuvantes no se comportan igual. Algunos pueden aumentar al mismo tiempo la viscosidad y la rigidez; los cuales deben evitarse.

Para reducir la sedimentación se pueden utilizar productos que aumentan el volumen del mortero antes del fraguado. Generalmente lo constituye un polvo fino de aluminio que, al reaccionar con la cal y el cemento desprenden numerosas burbujas de hidrógeno, las cuales tienen el mismo efecto de los coloides para evitar la sedimentación.

d.2.- **Dispersión física o thermocol:** Es un procedimiento que consiste simplemente en recalentar el mortero. Esto se puede lograr calentando únicamente el agua y luego una mezcla simple de agua cemento.

Para un mortero de cemento portland dosificado en la relación a/c, 1/2 a 1/2.2 es suficiente alcanzar una temperatura final de 35° C; para dosificaciones más fuertes se requieren temperaturas menores.

Con este procedimiento se obtienen morteros que no tienen sedimentación, debido a que para un mortero con dosificación dada, la temperatura produce un aumento de la rigidez y una disminución de la decantación.

La elevación de la temperatura provoca además un aumento en la viscosidad del mortero (5).

Este procedimiento no se aplica a los cementos desprovistos de cales tales como cemento portland tipo II y IV que son resistentes a los sulfatos.

d.3.- Dispersión mecánica: Se obtiene haciendo pasar un mortero de cemento por un mezclador especial que produce un laminado violento, o haciéndolo pasar por un atomizador, aunque con esto sólo se logra la fluidificación de morteros inyectables y no así la estabilidad deseada; la cual se alcanza con un calentamiento prolongado de 10 a 15 minutos, que provoca una elevación de la temperatura aumentando la viscosidad y la rigidez, análogo al thermocol.

e.- Mortero de fraguado rápido: Con el objeto de reducir la fuga durante la inyección es necesario disponer de morteros con una cierta resistencia mecánica y fraguado relativamente rápido (de 15 a 30 minutos). La resistencia mecánica impone el empleo de cemento en dichos morteros.

En cuanto al fraguado acelerado, éste puede lograrse de tres maneras:

- a.- Por dosificación conveniente de un acelerador de fraguado.
- b.- Mezclando cemento aluminoso y cemento siderúrgico.
- c.- Utilizando un producto que aumente la viscosidad del mortero.

El uso de los dos primeros presenta el inconveniente de obturación de los conductos de inyección, por endurecer el mortero rápidamente. El tercero, se logra añadiendo aserrín, el cual absorbe tal cantidad de agua haciendo que el mortero se haga pastoso e incluso detiene su circulación; los mejores resultados se logran con aserrín completamente seco y con un diámetro inferior a dos milímetros, con una proporción expresada en litros del 5% al 7% del peso del cemento en kilos.

f.- Morteros económicos: Se logran reemplazando parte del cemento por un polvo de granulometría similar; éste puede ser polvo de piedra inerte, pero también es perfectamente utilizable el hollín de ciertas centrales térmicas, conocido como cenizas volátiles, el cual es abundante, barato y adaptable a la elaboración de mortero para inyección. La viscosidad se modifica poco, por una adición de hollín relativamente importante (6).

g.- Morteros de arcilla tratada: Son suspensiones de arcilla en agua a las cuales se les añade un aditivo desfloculante apropiado para permitir una inyección satisfactoria. Estos morteros pueden ser usados con excelentes resultados en la realización de pantallas impermeabilizantes, capaces de resistir cargas apreciables de agua; no ocurriendo lo mismo en consolidación; ya que no tienen ninguna resistencia mecánica.

Las arcillas que tienen granos con diámetros menores a centésimas de milímetros pueden ser usadas para rellenar los intersticios más pequeños del suelo, pero es necesaria desflocularla al máximo en el mortero.

Existen numerosos métodos para desflocular las suspensiones de arcilla, algunos sencillos, pero imprácticos y antieconómicos.

En general lo que se persigue es obtener arcillas coloidales capaces de penetrar en los pequeños intersticios del suelo, bien sea para consolidar, impermeabilizar o ambas. Una manera sencilla es recurriendo a un gel de sílice obtenido partiendo de un silicato de sodio y de un reactivo; ácido clorhídrico, por ejemplo. Otra manera es mezclando arcillas de naturaleza diferente y adición eventual de un producto químico, como nitrato de potasa, que

actúa como agente desfloculante.

A continuación se muestra en el cuadro II-1, las dos maneras de proceder-

CUADRO II-1

	Gel de sílice	Acido Clorhídrico
Arcilla seca	460 Kg	500 Kg
Arcilla de Provins seca	40 Kg	—
Nitrato de potasa (KNO_3)	7 Kg	—
Silicato de sodio (36º B)	—	alrededor de 3 l
Reactivo	—	" " " 10 l
Agua	800 l	800 l

Ref. Inyección de suelos. H. Cambefort.

Estas proporciones corresponden a 1 m^3 y una densidad aproximada de 1.3 kilogramos por decímetro cúbico.

La mezcla de arcillas de naturaleza diferente y la posible adición de productos químicos, puede dar al mortero una viscosidad distinta a la esperada, esto se debe a que se está mezclando productos coloidales.

Es muy importante el orden de mezclado, ya que dependiendo de éste, se obtiene una mayor o menor viscosidad. Se recomienda colocar el silicato antes del constitutivo arcilloso, lo cual origina que la viscosidad final sea más débil. Este hecho es muy favorable porque permite aumentar la dosificación de arcilla, conservandose la misma fluidez.

Se puede lograr un aumento de la fluidez utilizando un fluidificante en lugar de silicato, que en el caso de la bentonita, se logran morteros fuerte

mente tixotrópicos.

Bases para la elección de la arcilla.

Con la ayuda de la experiencia y los límites de Atterber correspondientes a la arcilla se puede elegir las más aptas. Basándose particularmente en el límite líquido, para valores superiores a sesenta, la arcilla puede ser aceptable, en caso contrario es necesario adicionarle coloides.

Por otra parte, elegida la arcilla, la experiencia indica que el proceso determinado en el laboratorio debe seguirse en la obra.

h.- Morteros de suspensión de arcilla cemento: Para evitar el deslavado de una arcilla durante la inyección, es necesario que esta posea una fuerte tixotropía. Esto se logra adicionando cemento, que además proporciona una cierta resistencia mecánica al producto final.

Podría pensarse que el mortero no es apto para la inyección de intersticios muy finos en los que se hacen tratamientos de arcilla pura; sin embargo la experiencia ha podido verificar que esto no ocurre realmente, pues, en un mortero de arcilla pura los granos no son totalmente desfloculados, lo que hace que, el tamaño influyente sea el diámetro de los flóculos y no el de los granos.

Para tener una fluidez conveniente, los morteros arcilla-cemento estan, en general, dosificados debilmente en cemento y fuertemente en arcilla, contrario a los morteros B/C, debido a que la bentonita es mucho más coloidal que

la arcilla.

Ensayos realizados por CARON (6), llevan a las siguientes conclusiones:

- i.- sí lo que se desea es una resistencia apreciable es necesario que la relación agua cemento sea mayor o igual a dos.
- ii.- sí se quiere una simple consolidación y una limitación de radio de acción de la inyección por tixotropía es necesario una relación a/c mayor a cinco.
- iii.- sí se desea que no tenga carácter tixotrópico se puede aumentar más la relación a/c.

I.- Mortero de arcilla-cemento-arena: Estos morteros son utilizados cuando no existe una limitación en el tamaño máximo de los granos del mortero, es decir, cuando los espacios vacíos a rellenar son suficientemente grandes (en el orden de los decímetros)

MORTEROS EN ESTADO LIQUIDO.

Se definen como líquido por estar constituidos por partículas cuya dimensión no puede ser medida fácilmente. Estos morteros pueden penetrar por todos los espacios vacíos por donde el agua discurra, para lo cual, la permeabilidad del medio no puede ser muy pequeña, como es el caso de las arcillas y limos, que prácticamente no son inyectables.

Los productos más usados son silicatos de sodio, patentado en 1836; resulta un poco costoso y por ello se le añade un polvo fino puesto en suspensión tal como cemento o arcilla de granos muy pequeños (bentonita), estos contienen, más o menos una cantidad de iones polivalentes solubles, capaces de congelar el silicato. Se puede obtener un gel, añadiendo uno de estos productos

al silicato. En caso de no producirse suficientes iones polivalentes, será preciso añadir una pequeña cantidad de reactivo que será siempre inferior a la necesaria en ausencia de estos productos sólidos, para que resulte económico.

El mortero-silicato-agua, tiene una sedimentación demasiado rápida por parte del cemento, lo cual se corrige con la adición de 1% o 2% de bentonita - que permite mantener el cemento en suspensión.

Con el aumento de la cantidad de bentonita se reduce mucho el tiempo de fraguado, esto es bastante favorable, ya que se puede jugar con las proporciones de los diferentes constitutivos para regular el tiempo de fraguado del gel cemento-bentonita-silicato y agua. Estos geles son más resistentes y menos permeables que los geles puros.

La adición de silicato y reactivo a una suspensión de arcilla o de bentonita, aumenta la rigidez de la misma. Esta propiedad le permite permanecer en el terreno después de la inyección, aún frente a fuertes gradientes hidráulicos.

Generalidades sobre los silicatos de sodio.

Los geles son obtenidos mediante la adición de un reactivo, cloruro de calcio por ejemplo, al silicato de sodio, formando una solución que al cabo de cierto tiempo se transforma en gel. Estos pueden ser duros o plásticos y se utilizan generalmente para impermeabilizar, ya que no tienen suficiente rigidez.

En el año 1957, se descubrió que utilizando como reactivo: acetato de etil

lo, Glioxal y Formamida, se llegó a resultados satisfactorios destacando que el primero es 30% o 40% más económico.

La característica común a los tres reactivos, es la introducción en el silicato de un reactivo orgánico que no tiene acción inmediata sobre el sodio del silicato; este reactivo orgánico debe transformarse en nuevos cuerpos que sean reactivos coagulantes del silicato de sodio.

Con acetato de etilo se obtiene una saponificación que libera el ácido y el alcohol, los dos, reactivos del silicato. Esta transformación es lo suficientemente lenta para que el reactivo orgánico de base pueda introducirse en el silicato sin correr el riesgo de una coagulación prematura en el período de agitación o durante la conducción. En este caso el gel obtenido se caracteriza por su gran resistencia mecánica, del orden de 20 kg/cm^2 en geles puros y, 30 kg/cm^2 en mezclas de geles-arenas.

La figura II-5, muestra la evolución de la resistencia en función del tiempo en un gel de acetato cuyo comportamiento es similar al de los cementos,

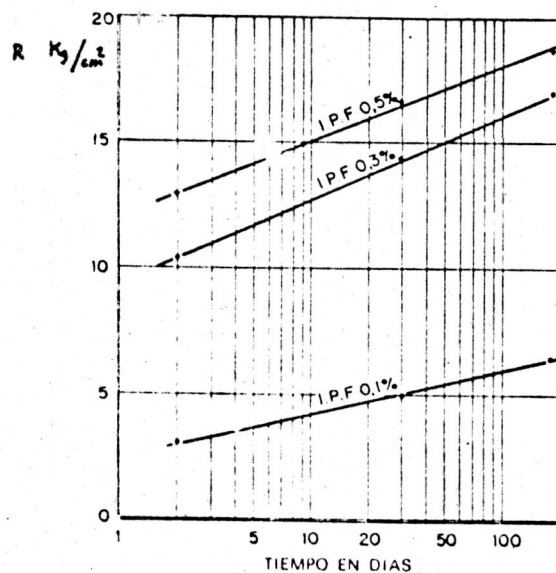


Figura II-5. Variación de la resistencia de un gel de acetato. (Ref. Inyección de suelos. H. Cambefort).

este aumento de resistencia en el tiempo sigue una ley logarítmica en el caso de aplicación instantánea de carga; de no ser así se produce una fluencia la cual es proporcional al tiempo e irreversible.

Contrariamente la arena inyectada con este mortero no sufre ninguna fluencia y su resistencia es aproximadamente el doble (figura II-6)

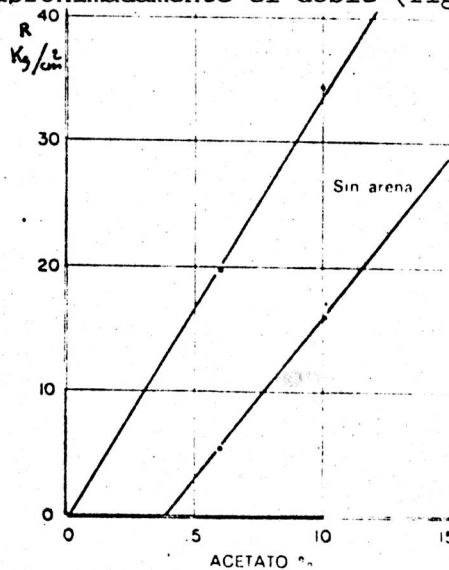


Figura II-6. (Ref. Inyección de suelos. H. Carbefort)

Debido a la alta viscosidad que presentan los morteros, es necesario inyectar con fuertes presiones para caudales normales, siempre y cuando los suelos tengan una permeabilidad mayor de 10^{-4} metros por segundo.

En el caso de suelos con menor permeabilidad, es necesario reducir la viscosidad del mortero, utilizando para ello un 30% o 40% de agua. Desgraciadamente la resistencia disminuye muy rápidamente con estos morteros diluidos lo que se puede subsanar con la utilización de uno o varios productos coadyuvantes.

Estos morteros en estas condiciones son muy costosos pero como se necesita un menor número de taladros hace que el costo en obra sea menor.

Los inconvenientes de estos geles son:

- a.- Cuando se utiliza silicato puro o poco diluído, la composición de éste tiene una importancia considerable hasta el punto de tener que utilizar reactivos orgánicos y minerales. Estos morteros son, entonces sensibles a los errores de dosificación.
- b.- El frío actúa sobre el silicato antes de la elaboración del mortero, influenciando la transformación del gel.
- c.- Los geles presentan sinéresis dependiendo de la composición del silicato y de la naturaleza del reactivo, aunque esta no se produce en los espacios vacíos del terreno si son pequeños.
- d.- Son solubles en agua, sin embargo, soporta los intensos lavados a que son sometidos en las pruebas de laboratorio, debido a que la sinéresis impide la dilución, obteniendo resultados enteramente satisfactorios.

Determinación del tiempo de fraguado de los morteros líquidos.

El tiempo de fraguado es el tiempo que tarda un mortero líquido en transformarse en sólido. No es fácil determinarlo y más en el caso de silicato de sodio.

La medida de la viscosidad no es una buena referencia para determinar el tiempo de fraguado, ya que es muy impreciso debido a que el aumento de la viscosidad no implica fraguado (figura II-7). Por el contrario, la medida de la rigidez detecta un aumento de la misma en el momento del fraguado como se puede apreciar en la figura II-8, pero no se puede determinar un tiempo de fraguado exacto, por la aparición progresiva de este aumento.

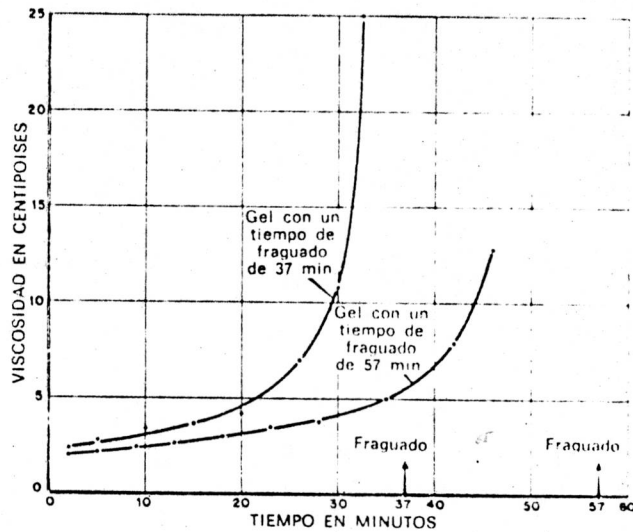


Figura II-7. Variación de la viscosidad en función del tiempo para dos geles de silicato de sodio.
(Ref.- Inyección de suelos. H. Carbefort)

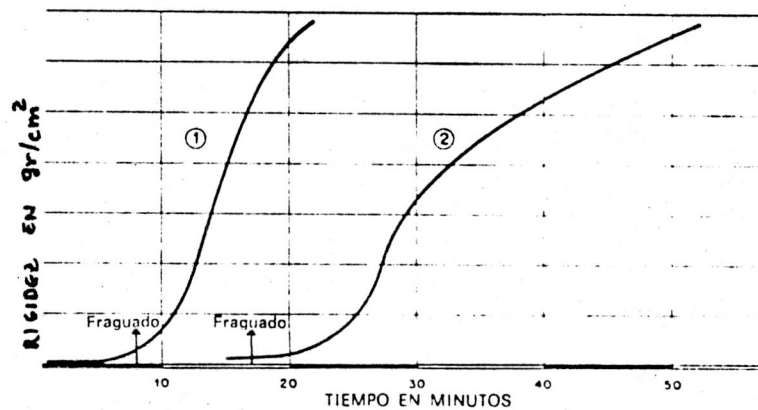


Figura II-8. Variación de la rigidez de los geles en función del tiempo.
(Ref.- Inyección de suelos. H. Carbefort)

En obra, es suficiente siempre y cuando se utilice el mismo criterio durante todo el trabajo con algunos procedimientos sencillos, por ejemplo, invertir el recipiente que contiene el gel; cuando éste deja de verse es que se ha alcanzado el fraguado.

Factores que influyen en la duración del fraguado:

- a.- Reactivos: La dosificación del reactivo debe hacerse con una gran precisión para no alterar el tiempo de fraguado.
- b.- Dilución: Si se desea mantener constante el tiempo de fraguado, es necesario que el volumen del reactivo sea función lineal del contenido de agua del gel (figura II-9).

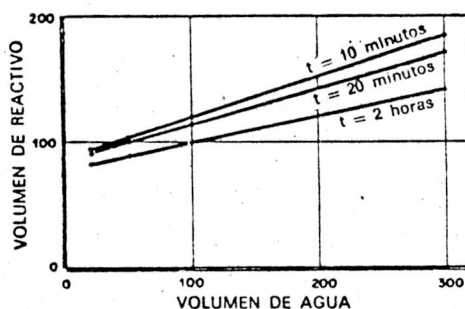


Figura II-9. Influencia de la dilución sobre el tiempo de fraguado.
(Ref.- Inyección de suelos. H. Cambefort)

La concentración del gel no acelera el fraguado si se añade cierta cantidad de agua, en todo caso lo retarda. Por otra parte los geles menos concentrados en reactivos son menos afectados por la dilución.

- c.- La elevación de la temperatura acelera la velocidad de reacción, la cual se duplica cada vez que la temperatura se eleva unos 10° C.
- d.- Tanto la presión de inyección como el proceso de agitación no influyen en el fraguado.
- e.- Medio inyectado: Si durante la inyección se consigue agua caliente contenida en el terreno, se acelera el fraguado. Sucederá igual si el agua está mineralizada.

INYECCION DE UN MEDIO PERMEABLE E ISOTROPICO.

Al llevar a cabo una perforación en un medio homogéneo e isotrópico de permeabilidad K y se inyecta el mortero a cierta presión P_o , se producirá un desplazamiento radial del mortero en dicho medio (figura II-10), ahora bién,

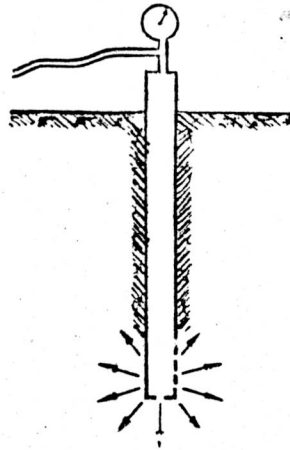


Figura II-10. Circulación radial del mortero en curso de inyección. (Ref. Inyección de Suelos.H. Carbefort)

cuando el desplazamiento es permanente se cumple:

$$P_o - p = \frac{Q - \bar{w}}{C \times K} = \frac{Q \times \nu}{C \times K_o \nu_o}$$

donde: P_o : presión de inyección.

p : Es la presión en la zona perforada antes de la inyección.

Q : Caudal de inyección.

\bar{w} : Peso específico del mortero.

K_o : La permeabilidad al agua del medio empleado.

ν_o : La viscosidad del agua.

ν : La viscosidad del mortero o lechada de inyección.

C : Es un coeficiente que depende de la forma del depósito de inyección y es igual a $4\pi r_o$ para una esfera de radio r .

$$K = K_o \times \nu_o$$

Pudiéndose notar que la presión de inyección es directamente proporcional al caudal de inyección, al peso específico del mortero y a su viscosidad; e -

inversamente proporcional a la permeabilidad del medio.

La viscosidad de un mortero aumenta con el tiempo y su fraguado puede efectuarse en menos de una hora, además impregnar el terreno, en un espacio mayor que el pequeño volumen alrededor del depósito de inyección, puede necesitar presiones más elevadas, también se pueden producir resurgencias y, en algunos casos la potencia del aparato inyector puede ser insuficiente. Yendo al caso de los aluviones homogéneos, por ejemplo, la inyección debe realizarse aproximando enormemente los puntos de inyección de modo tal que queden impregnados todos los espacios vacíos del terreno.

INYECCION DE UN MEDIO PERMEABLE HETEROGENEO.

Por lo general casi todos los medios son heterogéneos y estratificados. Si en la perforación de inyección, un barreno atraviesa varias capas; el mortero se extiende hacia aquellas capas que poseen gran permeabilidad haciendo que las otras capas se comporten como paredes estancas. Ahora bien, culminada la inyección, se invierte el comportamiento de las capas, es decir, las capas más permeables se convierten en paredes estancas respecto a las otras, haciendo que el mortero penetre en las capas menos permeables. En ambos casos se está en presencia de un movimiento horizontal del mortero (figura II-11). Entonces hay que aplicar la ecuación de DUPUIT (S.R.) :

$$P_0 - p = \frac{Q \times \bar{w} \times \nu}{2\pi K_0 \cdot \gamma_0 \cdot e} \times \text{Ln} \frac{R}{r_0}$$

en donde :

e: es el espesor de las capas, supuesta constante.

r_0 : el radio de la perforación.

R: radio de acción, o más exactamente una constante de integración -

que se puede interpretar como la distancia a partir de la cual la presión es igual a p . El valor del radio de acción es muy difícil de determinar, nunca es muy grande; como figura bajo el signo logarítmico, su variación no tiene gran influencia.

Es de hacer notar que el caudal es proporcional al espesor de la capa a inyectar.

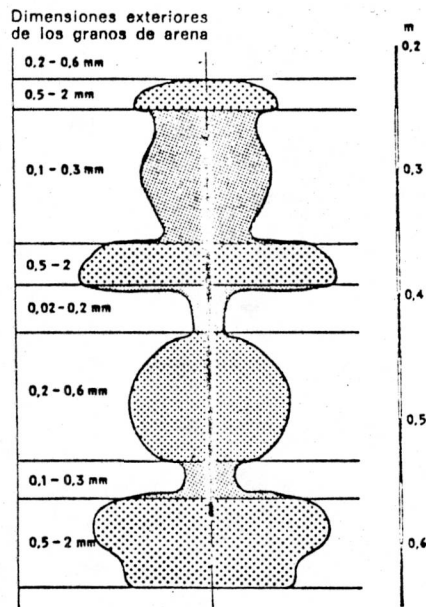


Figura II-11. penetración de un mortero muy fluido en capas de diferentes granulometrías.
(Ref. Inyección de Suelos. H. Carbefort)

Así pues, la inyección de una capa muy permeable puede necesitar presiones muy altas si su espesor es muy débil, por ejemplo, algunos centímetros; y como al no poder jugar con el espesor de las capas, sólo disminuyendo la viscosidad del mortero o el caudal de inyección se pueden rebajar las presiones. Siendo esta solución muy costosa, y el tratar de reducir la viscosidad resulta problemático ya que debe estar dentro de ciertos límites, lo cual origina que se inyecte a presiones elevadas.

El tiempo de duración de la inyección para terrenos heterogéneos, viene -

expresada por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{n \cdot \pi e \times (R^2 - r_o^2)}{Q}$$

siendo "n" la porosidad del suelo.

Para terrenos homogéneos:

$$t = \frac{4 \times n \times \pi \times (R^3 - r_o^3)}{3 \times Q}$$

DILUCION DE LOS MORTEROS DE INYECCION QUE SE MEZCLAN CON AGUA.

Con morteros corrientes que se pueden mezclar con el agua la experiencia - demuestra que el mortero no rellena inmediatamente los intersticios, sino que se extiende por sitios que ofrecen poca dificultad, de modo tal que van rodeando los granos gruesos que le permiten diluirse. De esta manera si se inyecta una columna cilíndrica de arena con un gel de silicato, se ve, que en vez de salir agua pura se recoge muy rápidamente un gel fuertemente diluido, - esto hace que el volumen de mortero a inyectar debe ser notablemente superior al volumen de espacios vacíos, para que la dilución sea despreciable (7).

Este fenómeno se concibe fácilmente a consecuencia de la tortuosidad de los filetes de mortero que circulan entre los granos y que absorben progresivamente el agua del terreno inmóvil que está fuera del paso de estos filetes.

La dilución del mortero en el seno del terreno aumenta el volumen afectado por la inyección, además, la dilución del mortero va acompañada de un aumento en el tiempo de fraguado y de una disminución de la rigidez del producto final. Esto explica porqué la composición química del agua de las capas influyen en

el comportamiento de los morteros. Así, es por lo que los geles de silicato cuyo tiempo de fraguado está por el orden de la media hora, pueden coagularse en varios minutos si la mineralización del manto es suficiente.

INYECCION DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO EN UNA FISURA.

La inyección de un fluido en una fisura de abertura constante, corresponde a una circulación plana. La siguiente relación establecida por J. BRILLANT, no constituye más que una primera aproximación.

Si P_0 es la presión en una tubería de radio r_0 que atraviesa una fisura de abertura "e" y p la presión a la distancia R , para una circulación laminar de caudal Q , se tiene:

$$P_0 - p = \frac{\nu}{1-\alpha} \times \frac{Q}{\pi} \times \frac{1+2\alpha}{e} \times \left(\frac{2}{e} \right)^{1+2\alpha} \times (R - r_0)^{1-\alpha} + \frac{\bar{w} (1+2\alpha) Q^2}{4g (2+3\alpha) \pi^2 e^2} \times \frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \quad (I)$$

siendo \bar{w} el peso específico del mortero.

El primer término corresponde a las pérdidas de carga por rozamiento y, - el segundo a la variación de la energía cinética debida a la circulación radial del mortero. Este segundo término se mueve entre límites muy próximos cuando α varía entre cero e infinito. Puede ser despreciado.

Ahora bien, esta relación está establecida para una circulación permanente y con valores conocidos de R , r_0 y e ; con estas condiciones se tiene que la presión de inyección P_0 depende únicamente del caudal Q , de la ley que rige la viscosidad del mortero y de su peso específico.

Dicho de otra forma: En la inyección de un mortero estable cuya viscosi-

dad no dependa del tiempo, la presión de inyección es función directa del caudal, es decir, si éste es constante la presión también lo es.

De esto se deduce una consecuencia muy importante: El volumen de mortero inyectado no está jamás limitado por un aumento de presión. Es preciso limitarle sistemáticamente. Por otra parte, esta consecuencia es válida tanto en la inyección de una fisura como en la inyección de aluviones. De hecho manteniendo un caudal constante, la presión puede aumentar ligeramente, esto se debe primeramente al aumento de R y por otro lado al aumento de la viscosidad en función del tiempo. Pero este aumento de la presión casi nunca es suficiente para alcanzar una presión de rechazo parecida a la que se observa en los morteros inestables. Si se quiere obtener tal presión hay que utilizar morteros de fraguado acelerado, aumentando a la vez la viscosidad y la rigidez.

INYECCION DE UN FLUIDO NEWTONIANO EN UNA FISURA.

Dando el valor de $\alpha = 1$ en la expresión (I), se obtiene la relación que condiciona la circulación laminar de un fluido Newtoniano en una fisura (8).

$$P_o - p = \frac{6\sqrt{Q}}{\pi e^3} \ln \frac{R}{r_o} + \frac{3\bar{w} Q^2}{20 g \pi^2 e^2} \times \left(\frac{1}{r_o^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (\text{II})$$

Eliminando el último término se tiene que:

$$K = \frac{\bar{w} \times e^2}{12} \quad (\text{ECUACION DE DUPUIT})$$

siendo K el coeficiente de permeabilidad de la fisura. Por lo que la presión es proporcional al caudal.

Es prácticamente imposible tener en cuenta todos los efectos de la circu-

lación para determinar con precisión la influencia del número y abertura de las fisuras, pero se puede tener una idea suponiendo:

- a.- Régimen laminar
- b.- Macizo rocoso rígido y,
- c.- Pérdida de carga por rozamiento sea preponderante.

Con estas tres condiciones la pérdida de carga es inversamente proporcional al cubo de la abertura "e" de la fisura.

Si la perforación atraviesa n fisuras, de abertura e_0, e_1, \dots, e_n ; el ensayo de agua dará el mismo resultado que para una fisura de abertura "e", si:

$$e^3 = e_0^3 + e_1^3 + e_2^3 + \dots + e_n^3 \quad ; \text{ estando en el orden de la décima del milímetro :}$$

Entonces, se concluye que con igual abertura: A mayor número de fisuras el terreno es muy permeable, esto implica que la absorción de mortero de cemento es prácticamente nula.

A menor número de fisuras la permeabilidad es muy débil, esto implica que la inyección sea posible y que la absorción del cemento puede incluso no ser despreciable.

Esto indica que no se puede relacionar estrechamente absorción de agua con absorción de cemento, aunque en determinados sitios puede existir correlación porque la abertura de las fisuras depende de ciertas condiciones geológicas, por lo que se justifican perforaciones de reconocimiento, a través de las cuales se puede determinar la naturaleza del mortero y el método de tratamiento mejor adaptado al terreno.

A pesar de todo ese control tomado, siempre quedan algunos sitios de fisu-

ración muy finas que escapan a la inyección normal, por lo que habrán perforaciones a través de las cuales se inyectará un mortero especialmente penetrante.

INYECCION DE UN MORTERO INESTABLE EN UNA FISURA.

Este tipo de inyección de suspensiones de cemento en agua, ha sido la base fundamental para que los sistemas de inyección se desarrollen. Suspensiones que tienen una relación a/c que varían de 10/1 hasta 1/1 y además son esencialmente inestables, siendo magnífico su empleo para la obturación de fisuras, sin existir aún teoría alguna que explique el porqué de esto.

A raíz de numerosos ensayos realizados en laboratorio, se puede plantear como comprender el problema: Primeramente se sabe que una suspensión de arena y grava en agua puede circular a través de un conducto si posee suficiente velocidad, ahora bien, por debajo de su velocidad crítica los granos se depositan y el conducto se obstruye.

En aquellas suspensiones en las cuales su granulometría sea muy parecida a la del cemento, la velocidad crítica de depósito será tan grande como fuerte sea la concentración de la suspensión. Si la lechada de inyección es muy espesa, al terreno le cuesta mucho absorberla, por eso, si se quiere hacer una buena impermeabilización, se necesitan colocar muy próximos los barrenos. Por el contrario, si el mortero está poco dosificado, en ningún momento es rechazado por el terreno.

Vale la pena hacer notar los resultados de H. JULSTROM (S.R.), los cuales demostraron que partículas de diámetro igual a 0,05 mm, muy próximas al

diámetro de los granos gruesos del cemento, se depositan con velocidades de circulación del orden de 3 a 4 cm/seg, y para removerlas o colocar en suspensión el depósito se requieren velocidades de 20 a 30 cm/seg.

También se ha visto en la interpretación de los Ensayos LUGEON (9) que se puede abrir una fisura bajo el efecto de la presión de inyección.

TERRENOS CON FLUJO DE AGUA. (10).

Muchas aplicaciones de inyecciones químicas son hechas en formaciones parcial y totalmente saturadas; también en formaciones secas, granular o fracturadas. En general, son destinadas a impermeabilizar, más, que para incrementar la resistencia.

Bajo grandes extensiones de terreno llano, la proporción de agua subterránea es relativamente baja y generalmente no influye en la operación de inyección. En terrenos irregulares o montañosos, el flujo de agua puede afectarla rápida y desfavorablemente. Si el flujo es suficientemente rápido, puede causar problemas en los alrededores de la excavación. Aún en áreas donde el flujo de agua es normalmente insignificante, se pueden producir condiciones locales de alta rata de flujo a consecuencia de la inyección inicial.

Así pues, el movimiento de agua subterránea siempre debe ser considerado cuando se planifique un programa de inyección.

Ensayos de laboratorio bajo condiciones absolutamente uniformes, es posible obtener una verificación exacta de la teoría de los fluidos en una arena isotrópica, uniforme y saturada. La inyección desde un punto dentro de la masa de arena puede esperarse radial uniforme (figura II-12); teniendo así, que la masa estabilizada resultante podría ser teóricamente una esfera (fig. II-13) Esto es sustancialmente verdad si la presión de inyección es significativamente más grande que la presión estática, y si el volumen estabilizado es suficientemente pequeño, que la presión hidrostática en el tope y en el fondo de la masa no sean apreciablemente diferentes.

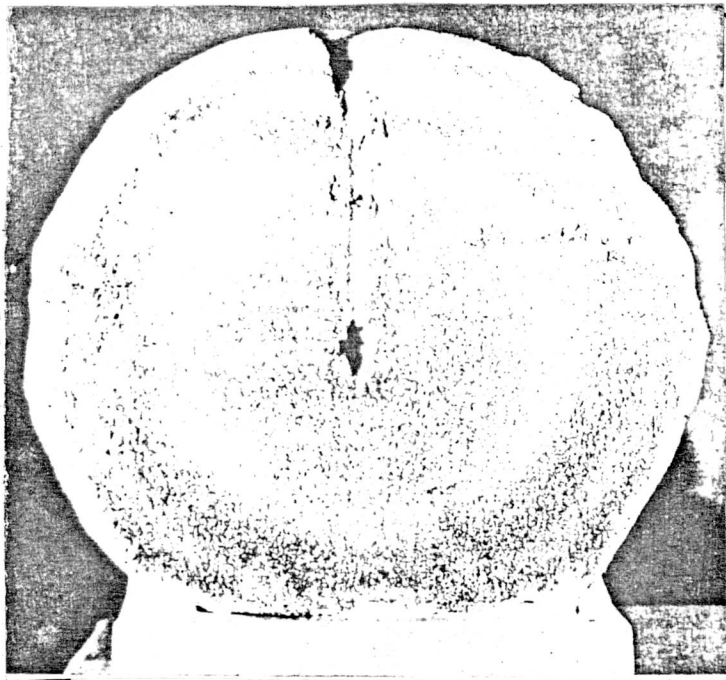


Figura II-12. Los anillos concéntricos presentan una distribución radial uniforme de la mezcla en una arena isotrópica saturada bajo una carga de agua estática. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations División. January, 1968)

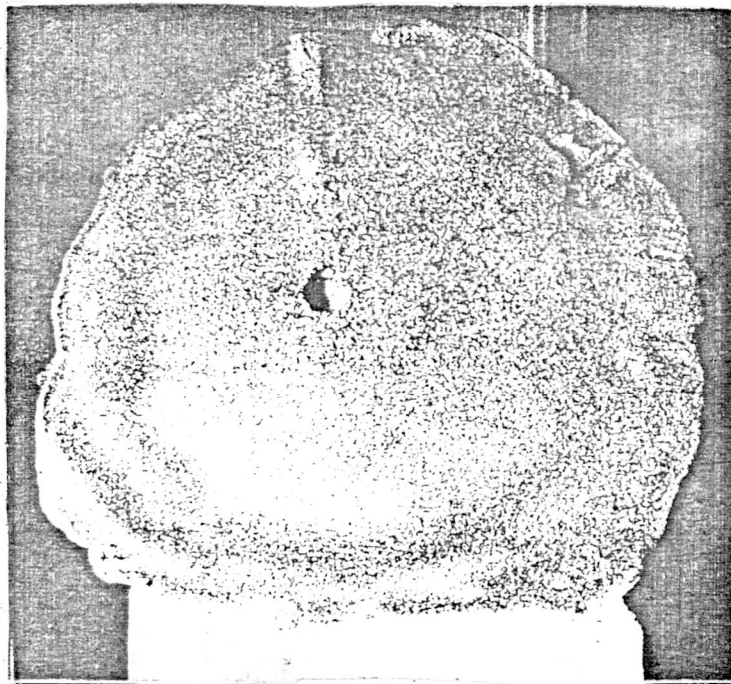


Figura II-13. Deslizamiento de la masa inyectada y pérdida de la lechada causada por la corriente de agua subterránea. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations División. January, 1968)

Se han obtenido excelentes verificaciones en muchos ensayos, tanto a escala de laboratorio como a escala de campo siguiendo el paso de la lechada en diferentes condiciones del terreno. Estos ensayos permiten establecer algunas conclusiones, tales como:

- Si el volumen de lechada líquida permanece en un sitio por un considerable espacio de tiempo, previo a la gelación, hasta una baja rata de flujo de agua puede causar desplazamiento de la lechada y una dilución a lo largo de la interface que se manifiesta por pérdida de la lechada.
- Cuando el agua subterránea fluye a una rata relativamente rápida, además del desplazamiento de la masa en la dirección del flujo, la forma del volumen estabilizado puede ser modificado conforme a la red de flujo causada por la introducción de un punto de alto potencial al final del conuacto de inyección. Este efecto es también causado a una rata lenta de flujo, cuando el lapso de tiempo entre la inyección y el establecimiento de la lechada es muy largo (figura II-14)

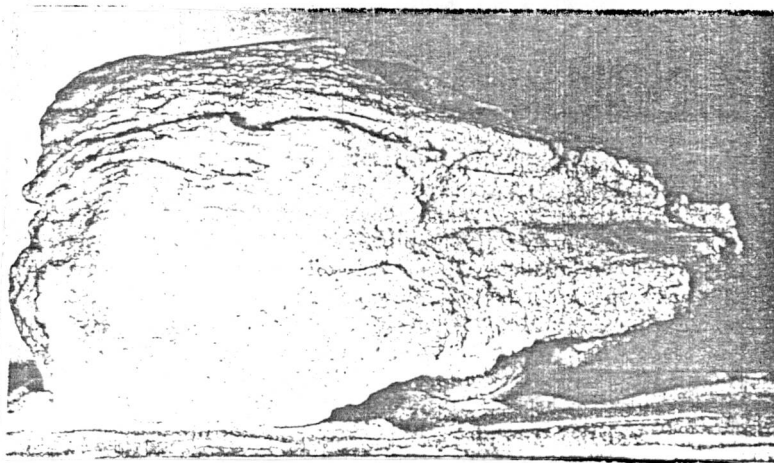


Figura II- 14. Desplazamiento y distorsión de un corte normal de una mezcla inyectada debido al flujo de agua subterránea y a un largo tiempo de gelación. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. January, 1968)

- Cuando las inyecciones son hechas en depósitos estratificados, el grado de desplazamiento depende de la permeabilidad de la formación, siendo este efecto mayor que la modificación de la forma inicial de la lechada, entonces, el grado de desplazamiento y la modificación de la forma, son función de la relación entre la rata de flujo de agua subterránea, la rata con que la lechada es colocada y el tiempo de gelación de la misma.

Penetración Uniforme.

En el campo es difícil inyectar un volumen completo de lechada en determinada área. Virtualmente en todas las operaciones de inyección, la lechada es colocada en varios puntos a lo largo de la perforación. Generalmente este procedimiento intenta tener como resultado, cilindros relativamente uniformes (figura II-15).



Figura II -15. Penetración horizontal uniforme, obtenida por el control propio de los parámetros mecánicos. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. January, 1968)

Se pueden producir esferas individuales tangentes y en el peor de los casos podrían estar completamente aisladas, producto de las diferentes elevaciones del conducto de inyección.

La experiencia permite establecer que si la distancia movida en el conducto entre inyecciones sucesivas es menor que la extensión radial de la lechada, la masa estabilizada tiende a ser uniforme. Pero aún, cuando la relación entre volúmenes y distancia de alcance es adecuada, se produce penetración no uniforme en depósitos naturales, cuando estos son estratificados y bajo condiciones extremas, el grado de penetración puede variar tanto, como las diferencias de permeabilidad natural (figuras II-16 y II-17), tomando en cuenta que la lechada seguirá el camino más fácil (a través de las capas más permeables)

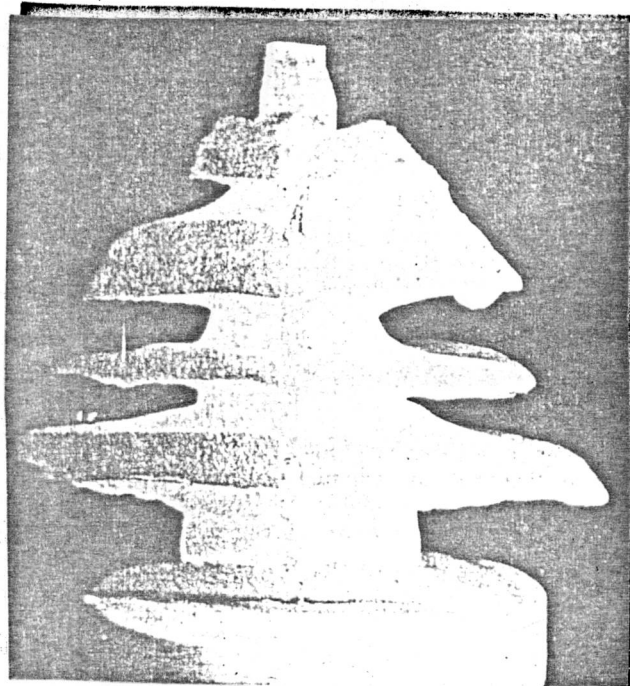


Figura II-16 . Penetración no uniforme en una estratificación.
(Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Enero.1968)

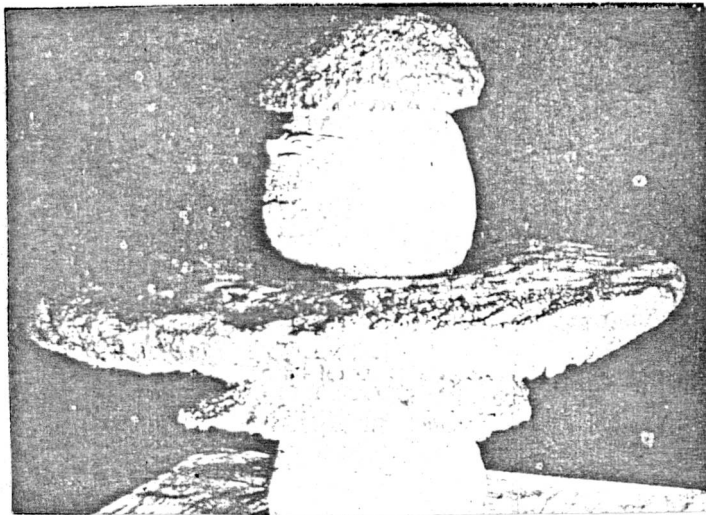


Figura II- 17. Uso ineficaz de la mezcla en un sistema de canales a través de una zona de alta permeabilidad. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. January, 1968)

Para modificar esta condición es necesario controlar el tiempo de asentamiento. De esta manera, si la lechada se hace que se asiente previo a la terminación de la operación de inyección, ésta se fijaría en los canales más abiertos donde ha ido primeramente y luego forzaría al resto de la lechada a fluir en los canales más finos. Esto es lo que se llama tiempo corto de gelación.

Teoría del Tiempo Corto de Gelación:

Cuando ocurre la gelación, comienza en una capa infinitesimal la cual es el límite entre la lechada y el agua subterránea. Como el bombeo continúa, un determinado número de canales es roto en dicha capa, por los cuales el resto de la lechada líquida es forzada a salir. En el punto donde terminan dichos canales, un flujo radial tridimensional comienza de nuevo. De esta manera, co-

mienzan a crecer hemisferios en la superficie de la esfera inicial y se repite el proceso integral.

Experimentos de laboratorio y campo han verificado que el mayor grado de uniformidad de penetración en estratos estratificados, ocurre cuando el tiempo de gelación es menor que el tiempo de bombeo en cada elevación.

Esta ley empírica en consideración al tiempo de gelación, es también operada bajo condiciones de flujo de agua subterránea. Bajo tales condiciones hay dos beneficios que se acumulan desde el uso de muy corto tiempo de gelación. (figuras II- 18 y II- 19):

- Incremento en la uniformidad de penetración.
- Minimizar el desalojamiento y dilución de la lechada.



Figura II- 18. Decrecimiento de un desplazamiento, distorsión y pérdida de la lechada, debido al uso de un gel con tiempo de gelación corto en depósitos estratificados ante la presencia de un flujo de agua. (Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Enero, 1968)

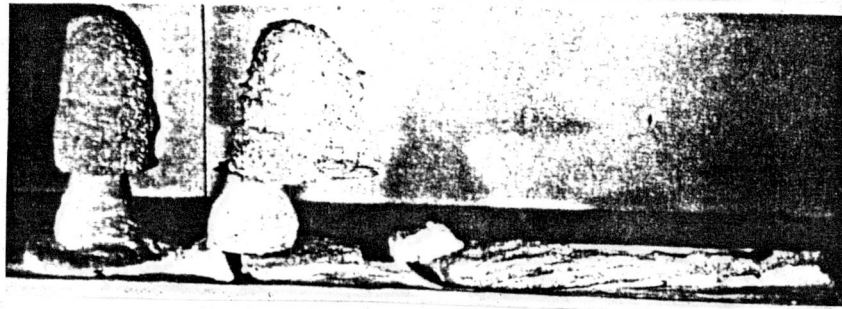


Figura II-19. Uso de un gel con tiempo de gelación largo, bajo la acción de un flujo de agua, como resultado de la pérdida completa de la lechada.

(Ref. Journal of the Soil Mechanics and Foundations División.
January, 1968)

CUADRO II-2

CARACTERISTICAS Y POSIBILIDADES APROXIMADAS DE LOS PRINCIPALES MORTEROS DE INYECCION

SUSPENSIONES	TIPO DE MORTERO		RESISTENCIA A LA ROTURA	CAMPO DE UTILIZACION	FORMA DE EFECTUAR LA INYECCION
	Morteros inestables	- Suspensiones de cemento en el agua (+ arena) C/A 1/10 a 1/1 o 1.5/1	Comparables al hormigón	Figuras de macizos rocosos o fábricas	Cantidades no limitadas pero obtenida a presión de rechazo
	Morteros estables (decantación de unas centésimas)	- Cementos y morteros activados - Cemento-arcilla (+ arena) - Arcilla tratada	1 a 50 kg/cm ² 1 g/cm ²	Figuras anchas + arenas y gravas K > 5.10 ⁻⁴ m/s	Cantidades limitadas
Morteros líquidos	Geles duros	Silicato de sodio { + CaCl ₂ + Acetato de etilo	10-20 kg/cm ² (mortero 40 kg/cm ²)	K > 10 ⁻⁴ m/s	- Inyección en 2 tiempos - Mortero único
	Geles plásticos	- Silicato de sodio + reactivo - Bentonita defloculada	- 50 g/cm ² - 10-20 g/cm ²	K > 10 ⁻⁵ m/s K > 10 ⁻⁴ m/s	Cantidades limitadas

(Ref.- Inyección de Suelos.
H. Carbefort)

PRESION DE INYECCION.

Es la presión necesaria para que el mortero penetre e impregne todas las fisuras existentes en el terreno a inyectar, de modo tal que dicha presión no debilite las características mecánicas del suelo o desorganice las construcciones que puedan existir en la superficie.

Presión de inyección para una única fisura:

La fuerza "F" que tiende a abrir una fisura, se obtiene suponiendo que la presión medida en el tubo de manguito a la altura de la fisura, se ejerce sobre un círculo cuyo radio de acción es tres o cuatro veces más pequeño que el radio de acción de la inyección; esto es cierto si hay circulación en la fisura. Si la fisura es poco profunda y paralela a la superficie del suelo y además si la presión es alta, se corre el riesgo de que se levante el terreno.

Presión de inyección para varias fisuras:

Por lo general, las fisuras no tienen la misma abertura, suponiendo que las fisuras AA y BB (figura II- 20) están más abiertas que las otras. La pre

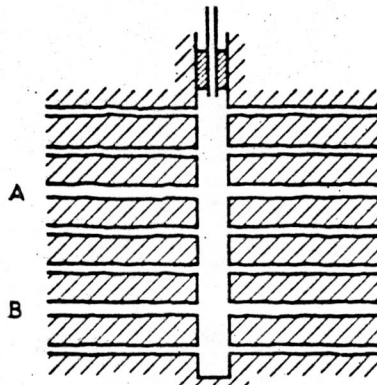


Figura II-20 . Inyección de varias fisuras paralelas.(Ref. H. Cambefort)

sión de inyección es la misma en la entrada de cada fisura. A principio, el mortero penetra en todas ellas, pero en AA y BB va más lejos porque están más abiertas, por lo que allí las presiones son más elevadas, trayendo como consecuencia una fuerte compresión de los dos semiespacios superior en AA e inferior en BB alcanzando un asiento importante; además el volumen comprendido entre AA y BB también se comprime.

Por el efecto de esta compresión, las fisuras finas se cierran y las anchas como las AA y BB son las inyectadas, pero llega un momento, como consecuencia de la inyección, en que estas fisuras llegan a ser iguales que las otras. Entonces, una o dos fisuras son las que se abren inyectándose a su vez.

Las fisuras AA y BB, inicialmente más anchas por la presión y parcialmente inyectadas por el depósito de cemento, vuelven a cerrarse. Sus paredes llegan a juntarse con el cemento inyectado, provocándose entonces una obturación total de la fisura. De esta forma, las fisuras son sucesivamente obturadas; primero las más grandes y por último las más pequeñas.

Todo esto hace comprender fácilmente que mientras mayor sea la presión, más posibilidad existe de inyectar las fisuras finas, ya que al abrirlas la fuerte presión permiten inyectarse aquellas fisuras que en estado normal son demasiado finas para permitir el paso de los granos de cemento. Esto es de gran importancia porque una gran cantidad de fisuras finas permite una circulación de agua tan importante como varias fisuras aisladas mucho más abiertas, fácilmente impermeabilizables a baja presión.

En el caso de que existan fisuras horizontales comunicadas entre sí por medio de fisuras inclinadas o verticales, éstas actúan como el medio de -

circulación desde la zona de fuertes presiones hacia la zona de bajas presiones.

Algunos Factores que intervienen en la escogencia de la presión:

- a.- Tamaño de las fisuras.
- b.- Profundidad a que se encuentran las fisuras.
- c.- Cuando un macizo rocoso no está completamente desorganizado por su fisuración (aquí se puede aumentar la presión).
- d.- En caso de rocas Kársticas que contengan cavernas de grandes dimensiones llenas de arcilla, y relativamente poco profundas, a presiones bajas puede provocar peligrosos levantamientos del terreno; en caso de no existir las cavernas se pueden utilizar sin peligro altas presiones.
- e.- Construcciones existentes cerca de la zona de inyección.

FENOMENO DE CONTRAPRESION.

Se dice que existe contrapresión cuando al detener la inyección el manómetro no vuelve a cero. Entonces abriendo una válvula de descarga ubicada cerca del manómetro se logra que la perforación expulse el mortero acumulado en una fisura ensanchada por la presión de inyección. En el instante en que ésta cesa, el mortero es rechazado al exterior por la elasticidad del terreno o por el peso del mismo. Si el mortero es de tal naturaleza que se solidifica durante la inyección, la contrapresión no tiene lugar ya que la fisura queda llena del mortero y conservará la abertura originada por la inyección.

CONTROL DE LA PRESION.

Se hace a través de manómetros controlados por un operador. Por lo general son dos: Uno ubicado en la central de inyección, de donde parte el mortero hacia el sitio a inyectar, y el otro ubicado en campo, en un sitio muy próximo a la zona de inyección y es aquí donde se encuentra la válvula de descarga. Estando ésta, a veces, conectada con la central de inyección, de modo tal de recuperar el mortero expulsado; en caso contrario, el mortero se pierde.

CONSECUENCIAS DE LA PRESION ALTA.

- a.- Facilitan la expulsión del agua sobrante, quedando solamente el agua de cristalización constituyendo un corrector de los posibles errores de dosificación.
- b.- Aumentan la adherencia de los sedimentos a los terrenos, incluso menos propicios.
- d.- Contribuye a evitar el fraguado de un magma más o menos enlodado.
- e.- Ensanchan fisuras demasiado estrechas y hace que penetre más adentro la lechada de cemento.
- f.- Crean en el terreno, siguiendo más o menos los planos de sus diaclasas, nuevas fracturas revestidas de una fina película impermeable, haciendo que la circulación de agua esté limitada por fuertes pérdidas de carga.

INFLUENCIA DEL DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES.

Se pensó en un principio que con perforaciones de gran diámetro las absorciones de un mortero son más fuertes que con perforaciones de diámetro peque

ño, esto porque, según el número de fisuras atravesadas por una perforación es proporcional a la superficie periférica. Siendo esta explicación manifiestamente errónea, por el contrario, si esas perforaciones han sido inyectadas con la misma presión, lo cual puede ser posible, la presión a la entrada de las fisuras es sensiblemente la misma en los dos casos.

Determinación de la presión de inyección para consolidación:

Debe inyectarse a presiones fuertes, dispuestas de tal forma que se pueda detener temporalmente la primera fase de inyección cuando comiencen a aparecer las resurgencias. La experiencia enseña que operando así, el macizo se va comprimiendo, las fisuras se abren cada vez con más dificultad y finalmente la presión sin resurgencia aumenta hasta alcanzar el valor deseado.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS INYECCIONES.

Ensayos de laboratorio:

Debido a la complejidad de la Teoría de la Inyección, no se ha establecido ningún método ni teoría para realizar ensayos de laboratorio; ya que es imposible reproducir en laboratorio todas las condiciones del terreno natural, particularmente su compresibilidad, por lo que esto ha hecho que observando el aspecto de las excavaciones, en un terreno inyectado, se haya ido comprendiendo los diferentes procesos de inyección.

Observaciones "In situ":

Se realizan a partir de las observaciones hechas en terrenos ya inyecta--

dos. La inyección puede ser, o bien, la inyección definitiva, a condición de que afecte un volumen de terreno muy importante, o, una inyección especialmente organizada que permita esta observación.

El empleo de este método consiste en estudiar y anotar concienzudamente - todas las observaciones resaltantes en la excavación, en cuanto a: Disposición del cemento, como quedaron los planos de estratificación, fisuras sin inyectar, grietas formadas, disposición del gel, etc.

Uso de la ENPASOL :

La ENPASOL es un aparato electrónico usado para la grabación y almacenamiento de los parámetros de perforación, a saber:

- a.- Presión fluída de perforación.
- b.- Torque o par de rotación.
- c.- Empuje sobre la herramienta.
- d.- Velocidad de avance.
- e.- Velocidad de rotación.
- f.- Dureza.
- g.- Diágrafo P.
- h.- Rata de bombeo (Pump-Flow-Rate)

EL registro de parámetros consiste en la medición y registro (como una función de profundidad) de una o más propiedades físicas medidas para el mismo taladro durante la ejecución del trabajo.

El registro de un parámetro tiene un comportamiento a prueba de agua, con

tiene además un registro gráfico con uno o más sensores adjuntos al taladro o barra perforadora. La unidad más simple de un taladro es la rata instantánea de penetración en relación a la profundidad (diagrafo P), los R. P. : PL3 y PL6, están hechos para ser instalados en todo tipo de máquinas perforadoras y para resistir condiciones dificultosas adquiridas en el sitio de trabajo. Todos los sensores son impermeables y están vinculados al contenedor de registros por cables resistentes equipados de conectores confiables.

a.- TORQUE: impulso rotativo utilizado por la máquina a través de la roca de acuerdo a las propiedades de la misma, este parámetro revela la medida de grava o marga compactada en la roca.

b.- PRESION : parámetro que mide la circulación de la presión del fluido (agua o fango). Cuando el corte de la herramienta , para la perforación a través de una formación muy pastosa: Arcilla o marga, la presión se incrementa. Inversamente las formaciones de alta permeabilidad, tal como la grava o piedra picada, causa una caída en la presión.

c.-Empuje sobre la herramienta: La medición de la penetración en la broca del taladro, es utilizado fundamentalmente para el control regular en las operaciones de perforación. Este parámetro complementa la información de la rata de velocidad en la investigación de cavidad, cuando la roca no reacciona ante los empujes del taladro a través de las cavidades, el empuje prácticamente se hace cero.

d.- VELOCIDAD DE AVANCE: parámetro que mide la ganancia o pérdida de agua. Esta se manifiesta en zonas abiertas con alta permeabilidad tal como grava o fisuras pronunciadas.

e.- VELOCIDAD DE ROTACION: registra la velocidad rotativa del taladro, se utiliza para regular la velocidad con que se va a taladrar.

f.- DUREZA: En la percusión del taladro la dureza de la roca llega a fortalecer la energía de la percusión. La medida de esta energía se hace con los rechazos por la formación de la roca. Esto demuestra claramente la existencia de durezas y rocas compactadas.

g.- DIAGRAFO P : Este parámetro mide la rata instantánea de penetración. Está directamente relacionado con las características mecánicas de la roca tal como el módulo de elasticidad. El diágrafo calcula la rata de penetración de una roca seleccionada por el operador, desde un milímetro hasta veinte centímetros de grosor. Esta medición delicada deja al diágrafo trazar ininterrumpidamente una curva mostrando diferentes propiedades en la roca y fisuras hasta menos de un centímetro de espesor.-

h.- RATA DE BOMBEO: La afluencia del bombeo del fluido está medida durante la perforación y va paralelamente con la presión.

CARACTERISTICAS FISICAS Y MECANICAS DE LOS MEDIOS INYECTADOS.

Una inyección se considera satisfactoria si y solo si después de fraguado el mortero, se logra el fin perseguido. Dicho de otra forma, una consolidación debe mejorar la resistencia mecánica del medio; y la estanqueidad, su impermeabilidad. Intuitivamente se puede pensar que para consolidar es necesario un mortero de una gran resistencia mecánica y para impermeabilizar, un mortero que tenga la menor permeabilidad posible. Pero la realidad es mucho más compleja. Se puede, en efecto, consolidar ciertas rocas fisuradas con morteros que sólo presenten una cohesión débil y el empleo de un mortero exclusivamente estanco no sirve de nada si la presión del agua le empuja y le desborda. Para una estanqueidad es preciso que la débil permeabilidad del mortero esté asociada a una rigidez, cuyo valor depende de la contextura del medio y de la carga hidrostática que solicitan la pantalla estanca. Es por

eso que los morteros exclusivamente viscosos, como los betunes puros, no deben ser utilizados para impermeabilizaciones definitivas ya que después de la inyección, su circulación en el subsuelo continúa extremadamente lenta, seguramente por efecto de la gravedad y de la presión del agua.

Los estudios teóricos que permiten resolver estos problemas son escasos y no pueden aplicarse más que a fisuras inyectadas. PRANDTL(S.R.) ha calculado la resistencia a la compresión de una fisura llena de una materia plástica, y MANDEL (11) la resistencia a los esfuerzos ejercidos según el plano de la fisura (resistencia al deslizamiento). Para los aluviones se realizaron varios ensayos en laboratorio con la finalidad de precisar las ideas que puedan obtenerse a priori.

Resistencia a la compresión de una fisura inyectada:

PRANDTL consideró únicamente el caso de las fisuras rellenas con materiales perfectamente plásticos, cuya resistencia al cizallamiento es constante e igual a "C". Dicho estudio corresponde al caso de una fisura infinitamente larga de anchura "l" y de abertura "e" (figura II-20.A). La relación que da la presión media "p", equilibrada por el relleno, en función de sus características, es :

$$p = C \times \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2e} \right)$$

siendo "e" notablemente menor que "l".

Este resultado fué obtenido experimentalmente por TRESCA en 1895.

Una consecuencia de este resultado es que es inútil querer limpiar una fi

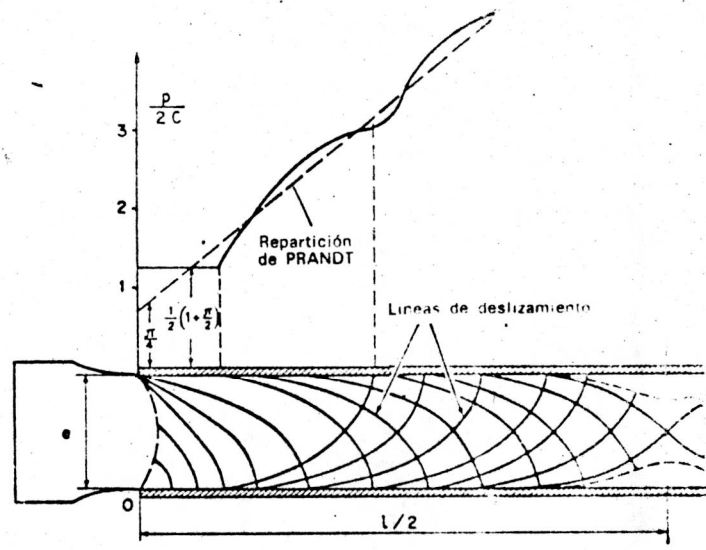


Figura 20.A. Repartición de las presiones que provocan la circulación de un cuerpo plástico comprendido entre dos placas paralelas infinitamente largas y de anchura l .

(Ref. Inyección de Suelos. H. Cambefort)

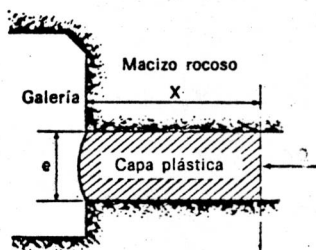
sura para sustituir su relleno arcilloso por otro producto mejor. Esto es muy importante porque la experiencia demuestra que no se llega jamás a lograr tal limpieza cualquiera que sea el procedimiento empleado: Circulación de agua, aire a presión o los dos a la vez.

Resistencia al deslizamiento de una fisura inyectada:

La ejecución de una pantalla de estanqueidad tiene por objeto mantener un nivel aguas arriba, a una cota superior al nivel aguas abajo. El relleno de las fisuras, cemento o arcilla, está entonces sometido a una presión que tiende a hacerla deslizar aguas abajo.

El estudio de éste fenómeno fué realizado por MANDEL, el cual establece dos hipótesis:

I.- Relleno coherente sin rozamiento interno (figura II-21)



$$q = \frac{Q}{e} = 2 C \frac{x}{e} = \text{Kg/cm}^2$$

Figura II-21. Deslizamiento de una fisura.
(ref. Inyección de Suelos. H. Cambefort)

II.- Relleno coherente con rozamiento interno.

$$q = \frac{Q}{e} = \frac{C}{\text{tg } \varphi} e^{kx/e} - 1$$

$$\text{con } k = 2 \text{tg}^2 \varphi \left(\cotg \varphi + \varphi + \frac{\pi}{2} \right)$$

RESISTENCIA A LA ROTURA DE LOS ALUVIONES INYECTADOS.

La inyección de arenas y gravas que no de más que a una penetración del mortero, rellena los huecos intersticiales conservando el contacto intergranular. Como el mortero posee cierta cohesión, su inyección tiene por finalidad reemplazar un suelo incoherente por un suelo que tenga al mismo tiempo una cohesión y un ángulo de rozamiento interno, éste es el mismo que existe antes de la inyección y la cohesión la suministra el mortero. Este resultado lógico es confirmado por ensayos triaxiales efectuados en laboratorio.

Los granos del terreno quedan recubierto por una película más o menos gruesa de mortero, que prácticamente no modifica su posición relativa. Los ensayos de laboratorio muestran que en ésta fase de inyección puede admitirse en primera aproximación la proporcionalidad entre ángulo de rozamiento interno y densidad después de la inyección (figura II- 22), disminuyendo esos dos valores cuando la inyección va más allá del relleno de los espacios vacíos iniciales. Pero puede concebirse que una afinidad química entre el mortero y los granos del terreno transforme un medio incoherente en un medio "continuo" de modo tal que el nuevo sólido obtenido tendría entonces características mecánicas sin relación directa con las del medio inyectado y con las del mortero.

Un fenómeno con estas características parece producirse, muy en particular en la inyección de arenas finas, en general silíceas, con morteros a base de silicato de sodio. Mientras que estos morteros dan geles líquidos de gran viscosidad, la arena inyectada con ellos no presentan ninguna fluidez y da resistencia a la rotura claramente superiores a las obtenidas por inyección rápida de gel puro.

C. CARON (12), demostró que con esos geles la resistencia a la rotura era una función lineal de la raíz cuadrada de la superficie específica de la arena (figura II-23). Trayendo como conclusión que las arenas finas se consolidan más fácilmente.

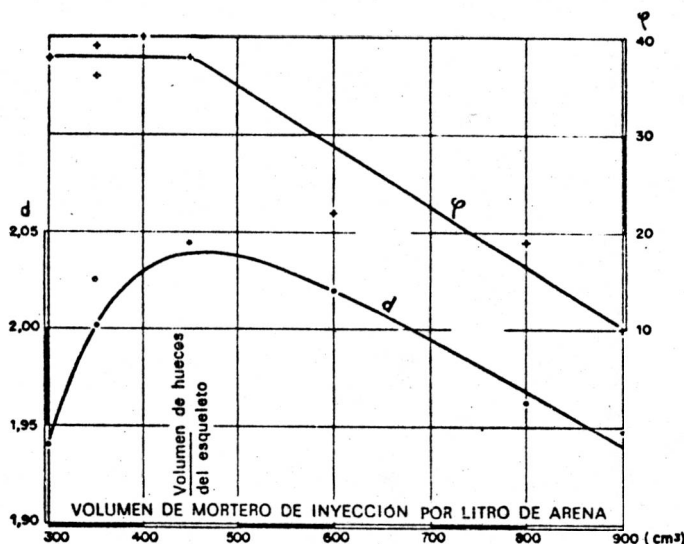


Figura II-22. Influencia del porcentaje de mortero de inyección en la densidad y ángulo de rozamiento interno de un medio inyectado. Este ángulo no varía en tanto que el volumen de mortero no exceda al volumen de espacios vacíos del esqueleto. (Ref. Inyección de Suelos. H. Caribefort)

RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE LOS ALUVIONES INYECTADOS.

Sea "n" la porosidad de los aluviones y "S" su superficie específica, "L" la longitud de la muestra, "s" su sección y "C" la cohesión existente entre el mortero y los granos; entonces la presión de deslizamiento "P" vendrá dada por:

$$s P = s L S (1 - n) C$$

de donde

$$p = (1 - n) L S C$$

Esa relación se ha comprobado con la realización de cuarenta ensayos, en los que se medía la presión de deslizamiento de un mortero de rigidez conocida "C"

inyectado en bolas de vidrio. En la figura II-23 se representan esos resultados y se comprueba que la relación es satisfecha, a pesar de la gran dispersión de las medidas; además, indica que el estado de la superficie de los granos no tiene influencia alguna apreciable en los resultados.

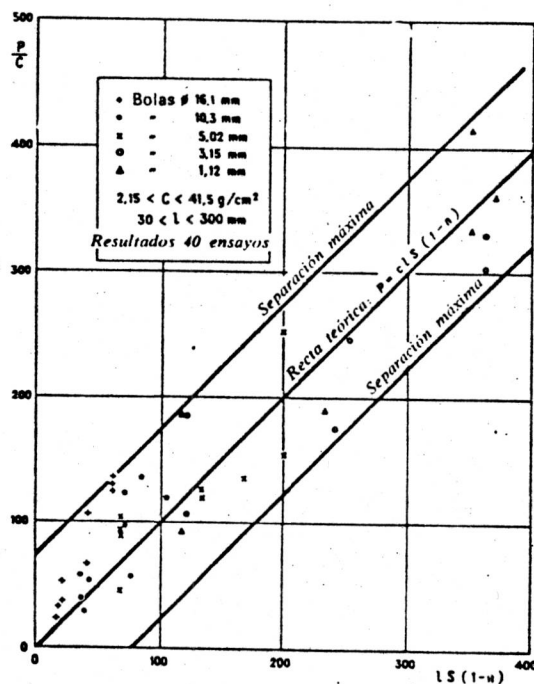


Figura II- 23. Presión de deslizamiento P para un mortero de cohesión C en función de la superficie específica S , de la porosidad n y de la longitud del medio inyectado. (Ref. H. Cambefort. Inyección de Suelos)

PERMEABILIDAD DESPUES DE LA INYECCION.

La permeabilidad final puede calcularse a partir de la del mortero y de la porosidad sí y solo sí el mortero de inyección llega a rellenar todos los espacios vacíos del subsuelo. Como la permeabilidad del mortero, después del fraguado, es muy débil, 10^{-10} m/seg, y puede ser hasta menos cuando se trata de cemento puro, se considera que la estanqueidad es prácticamente absoluta.

Esto es muy teórico, ya que la realidad es otra; en efecto se hicieron inyecciones con diferentes morteros a arenas cuyos granos estaban comprendidos-

entre 3 mm y 5 mm, estas inyecciones se lograron sólo con morteros estables; sin embargo, para estudiar los morteros inestables se confeccionó un mortero con esa arena y otro mortero de cemento puro con una relación a/c próxima a 0,5. Se observó que mientras la permeabilidad de los morteros puros estaba comprendida entre 10^{-8} m/seg y 10^{-9} m/seg, la de la arena inyectada fué mayor, 10^{-6} m/seg y 10^{-7} m/seg.

Esto se debe a que los morteros, incluso estables, presentan una ligera resudación en el momento del fraguado. Debajo de cada grano de arena, se forma un pequeño hueco que facilita el paso de agua, siendo éstos quienes producen una permeabilidad evidentemente superior a la del mortero puro.

No es la permeabilidad intrínseca del mortero lo que es esencial, sino la penetrabilidad, ya que es poco frecuente que se lleguen a rellenar todos los espacios vacíos porque unos son demasiado pequeños para permitir el paso del mortero y otros están mal comunicados con los taladros, esto hace que la permeabilidad final del medio inyectado dependa, casi exclusivamente, de la proporción de espacios vacíos no inyectados. Esta proporción no se puede medir y en caso de lograrse, no se deduciría nada. Pero es suficiente que un conjunto de espacios vacíos, incluso de gran dimensión, quede rodeado de un cerco estanco, para que el caudal de percolación se reduzca considerablemente.

El método más utilizado para determinar la permeabilidad es a través del Ensayo LEFRANC, midiendo los caudales de filtración.

DESLAVADO DE LOS MORTEROS DE INYECCION.

Son pruebas de agua que se hacen a muestras : Probetas, bloques de arena o aluviones inyectados, sumergiendolas en ella para observar el comportamiento

de los morteros ante la acción del agua. Si la permeabilidad no aumenta el mortero estuvo bien confeccionado, de lo contrario, estamos frente a morteros producidos con un reactivo inadecuado que los hace deslavables; en estos casos, el pasar del tiempo hace que la presión del agua les afecte e incluso que las circulaciones subterráneas los destruya.

TECNICA DE LA INYECCION.

INYECCION DE ROCAS FISURADAS:

La impermeabilización o consolidación de rocas fisuradas se hace por inyección. Estos dos resultados se obtienen simplemente adaptando la naturaleza del mortero utilizado que, es más resistente para una consolidación que para una impermeabilización, por lo que no hay una diferencia esencial entre estas dos clases de mortero.

Por el contrario, es el estado de fisuración del macizo el que impone un esquema de inyección variable, por eso es conveniente en el caso de una fisuración muy fuerte, en que existan fisuras de gran abertura, evitar una propagación lejana del mortero, siendo poco importante en el caso de que la fisuración sea fina, por eso es que el método de inyección deba ser adaptado a cada caso.

En principio se intenta, con una inyección previa, reducir el caso de rocas muy fisuradas a otras en que las fisuras más grandes tengan solamente unas décimas de milímetros de abertura.

INYECCION DE LAS ARENAS Y GRAVAS:

Existen varios métodos de inyectar aluviones, a saber:

- De abajo hacia arriba.
- Utilizando tubos con manguitos.
- De arriba - abajo.

INYECCION DE ABAJO - ARRIBA:

Es el más sencillo de los tres procedimientos, consiste en introducir un tubo en el suelo hasta que alcance el límite más profundo que deba ser inyectado. Se limpia el interior del tubo y después se le conecta con la máquina inyectora. Una vez hecho esto, se hace subir el tubo 20 cm o 30 cm y se inyecta el mortero. Cuando la cantidad prevista se ha introducido en el terreno, se vuelve a remontar el tubo otros 20 cm o 30 cm y así sucesivamente hasta el final. El diámetro del tubo puede ser cualquiera, máximo 100 mm.

Este procedimiento presenta tres inconvenientes:

- a.- Las resurgencias que puedan manifestarse alrededor del tubo alcanzan el conducto de la inyección, soldando a veces el tubo con el terreno.
- b.- La inyección de capas profundas no puede hacerse más que empalmando unos tubos con otros. Es una operación muy costosa y, además, el peligro de soldarse al terreno de estos tubos aumenta.
- c.- Cuando se dá fin a la inyección no es posible reanudarla, a menos que se haga un nuevo taladro. El trabajo se lleva a ciegas.

INYECCION CON TUBOS DE MANGUITOS:

El tubo con manguitos, utilizado y patentado por la SOCIEDAD SOLETANCHE, consti

tuye la evolución normal del vulgar tubo de revestimiento de taladro que se volaba con explosivos a la altura del medio a inyectar.

Este sistema consiste en, después de haber limpiado el entubado provisional de la perforación, se introduce en toda su profundidad un tubo de aproximadamente 4 cm a 6 cm de diámetro, perforado a distancias iguales (fig.II-24) Estos agujeros suelen estar hechos en grupos de tres por cada metro de longitud. Cada grupo está recubierto por un trozo de tubo o casquillo de caucho que actúa como válvula y que se denomina manguito, de esta manera, el mortero de la inyección puede salir del tubo, pero no entrar en él.

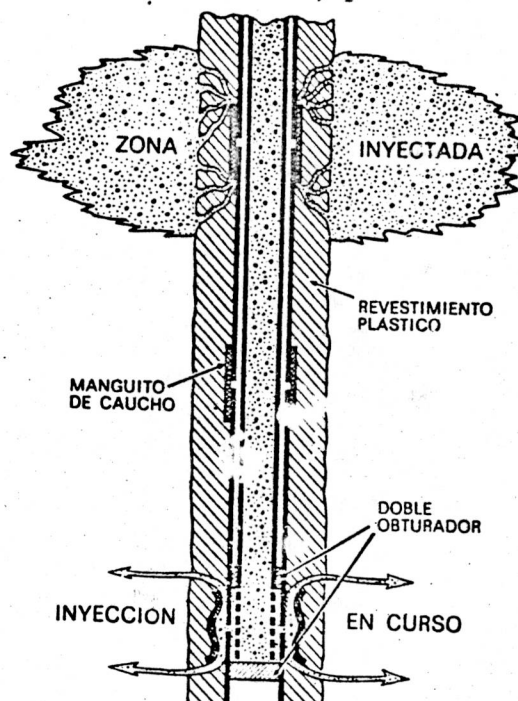


Figura II- 24. Inyección con un tubo de manguito.
(Ref. Inyección de Suelos. H. Cambefort)

Mientras se produce el alzamiento del tubo provisional de la perforación, se rellena un espacio anular comprendido entre éste y el tubo de manguitos, con una mezcla B/C. Una vez fraguado este mortero (48 horas aproximadamente), constituye un recubrimiento más o menos espeso que facilita el que se pueda adherir se perfectamente el tubo con manguitos al terreno.

Para que la inyección pueda realizarse, tiene que romperse el recubrimiento plástico en la parte que corresponde a los manguitos. Esta operación se - hace con una inyección de agua o de mortero a presión, localizada en el tramo de tubo con manguitos determinado por dos obturadores opuestos.

Las presiones de rotura pueden ser, muy bajas o muy altas : Desde unos kilogramos por centímetro cuadrado hasta sesenta o más kilogramos por centíme--tro cuadrado. En algunos casos no se puede conseguir romper el recubrimiento. Las presiones de rotura dependen del estado en que se encuentren las paredes de la perforación, de la composición del mortero o de la elasticidad del te--rreno.

El que no se pueda romper el recubrimiento depende de:

- Un desprendimiento en la perforación al proceder al alzado del tubo, puede dar un espesor al recubrimiento que haga difícil su rotura.
- Cuando la dosificación del cemento es muy elevada, siendo el recubrimiento normal. Si la dosificación es insuficiente, el recubrimiento será demasiado plástico y no se romperá frágilmente. Todo lo más, hará que se desprenda del tubo, favoreciendo la aparición de resurgencias a lo largo de éste e incluso expulsando el mortero hasta la superficie.

Un manguito adherido normalmente al macizo no funciona si no se tiene la precaución de aumentar la elasticidad natural del mismo recubriendo el manguito con una gruesa placa de caucho esponjoso.

La presión de rotura nos da una indicación sobre la presión de inyección. Aunque siempre inferior, ésta es sensiblemente proporcional. Sin embargo, para una misma presión de rotura y recubrimiento de idéntica composición en un

terreno determinado, la presión de inyección decrece a medida que la edad del recubrimiento aumenta.

Podría pensarse que, puesto que el recubrimiento endurece con el tiempo, la constancia de la presión de rotura se debe a una menor resistencia del terreno. Parece normal que la presión de inyección sea más baja.

Estas comprobaciones llevan a suponer que el terreno se rompe también, por que de otro modo la presión de inyección por impregnación, función de la permeabilidad de los aluviones, sería independiente de la presión de rotura del recubrimiento. En efecto cuidadosas observaciones han demostrado que la rotura se realizaba claramente en dos partes: La primera corresponde a la rotura del recubrimiento y la segunda a la rotura del terreno. Sin embargo, es posible que no sea siempre así y que las roturas del recubrimiento sean únicamente seguridad de una impregnación del terreno.

La inyección de los morteros se hace exactamente siguiendo el mismo proceso que el que ha servido para romper el recubrimiento. Cuando está detenido el doble obturador a la altura de un manguito, se envía la lechada con el inyector.

Gracias a este dispositivo es posible inyectar fácilmente capas muy profundas y separar los trabajos de perforación de los trabajos de inyección, lo que constituye una ventaja económica importante. Además, la inyección puede comenzarse por donde se quiera. Suele tener interés comenzar por los medios más permeables. Una vez obturados éstos, los morteros que se inyecten en las capas próximas de granulometría más fina no podrán aprovechar los niveles permeables para progresar hacia delante. Pero este proceso es delicado y costo-

so por lo que jamás se utiliza en práctica. Por el contrario, si el reconocimiento previo ha comprobado la existencia de capas de granulometría claramente diferente, con este procedimiento es fácil adaptar el mortero a la granulometría de la capa que se quiere inyectar.

Este método permite realizar una inyección correcta y relativamente económica a gran profundidad, por ejemplo cien metros, y además, volver sobre cualquier punto de la pantalla para finalizar una impermeabilización que fuera insuficiente o estuviera sin terminar.

Conviene recordar que la inyección provoca deformaciones en el terreno extremadamente importantes. Si los tubos con manguitos no son de buena calidad pueden destruirse al inyectar en las perforaciones próximas. Siendo capaces de conservar íntegra su sección, deben ser igualmente flexibles para adaptarse a las deformaciones del terreno. Estas deformaciones pueden incluso llegar a ser de tal magnitud que al arquearse el tubo impidan la colocación del obturador.

A pesar de que tengan que perderse en el terreno estos tubos, que además - tienen que ser de buena calidad, y aún necesitando una preparación importante para su utilización (perforación del tubo y colocación de los manguitos), - este método no es más costoso que los otros, porque permite separar los trabajos de perforación y de inyección. La buena organización de cada uno de estos trabajos proporciona un aumento de rendimiento que, en definitiva, compensa - bastante el precio de los tubos que se pierden; además, este método es el único que permite garantizar la calidad del trabajo, pudiéndose asegurar que las mejores realizaciones en trabajos de inyección de aluviones se han conseguido con este procedimiento.

INYECCION DE ARRIBA - ABAJO:

Este tipo de inyección se practica solamente cuando se taladra a rotación. Se comienza por empotrar, a la entrada de la perforación, un tubo provisto de un prensa estopa, a través del cual pasan los tubos que tienen un diámetro sensiblemente igual al del aparato extractor de testigos. (figura II-25).

Después de haber perforado en una cierta profundidad, se inyecta por tales conductos un mortero conveniente, remontandolos progresivamente a medida que vaya terminandose de inyectar. Estos tubos desempeñan la función de tubo provisional en la inyección de abajo- arriba.

Para que esta operación sea posible, es necesario, naturalmente, que la corona impida la formación de testigos en el seno del tubo. Esto se logra fácilmente en los aluviones.

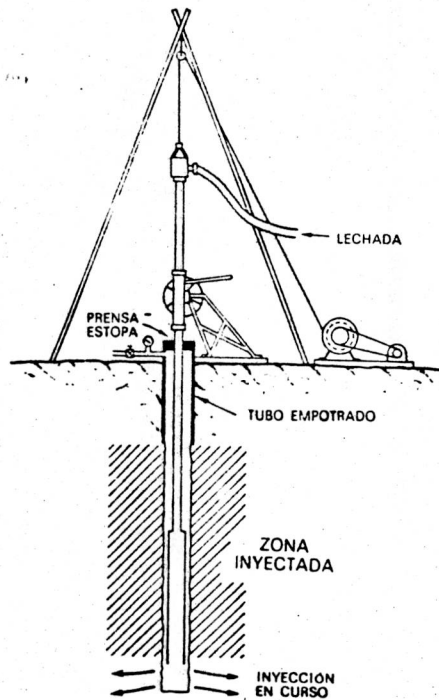


Figura II- 25. Inyección de arriba - abajo.
(Ref. Inyección de Suelos. H. Caribefort)

CUADRO II-3

ALGUNAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE INYECCION

TIPOS DE INYECCION	DE ABAJO HACIA ARRIBA	CON TUBOS DE MANGUITOS	DE ARRIBA HACIA ABAJO
<p>VENTAJAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Procedimiento muy sencillo - Diámetro del tubo puede ser cualquiera. Máximo 100 mm. - Es muy favorable en macizos rocosos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilita la inyección de aluviones. - El mortero puede salir del tubo pero no entrar en él. - Se puede adherir el tubo al terreno. - Se puede reinyectar usando las mismas perforaciones. - Se puede inyectar capas muy profundas fácilmente. - Se puede separar los trabajos de perforación de los de inyección. - La inyección puede iniciarse en cualquier tramo. - Relativamente económico. 	<ul style="list-style-type: none"> - En aluviones no se requiere de recubrimiento plástico. - Se puede inyectar a grandes profundidades.
<p>DESVENTAJAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Las resurgencias soldan a veces el tubo con el terreno. - En capas profundas hay que empalmar tubos, lo cual, hace la operación costosa. - Cuando se da fin a la inyección no es posible reanudarla. - En terrenos aluvionales, es preciso colocar forro, para evitar derrumbes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para que la inyección pueda realizarse, tiene que romperse el recubrimiento plástico, alrededor del manguito. - Los tubos utilizados no son recuperables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se práctica solamente cuando se taladra a rotación. - Hay que alternar perforación con inyección, lo cual provoca lentitud del proceso. - Se reperforan tramos ya inyectados.

PRESION DE INYECCION PARA ALUVIONES:

La presión de inyección se mide siempre a la entrada de la perforación. En el caso de la inyección de aluviones da mucho menos información que en la inyección de macizos rocosos; esto proviene de la naturaleza del mortero que siempre es estable. En este caso la presión depende únicamente de:

- La dimensión de los espacios vacíos del terreno
- La viscosidad y rigidez del mortero.
- El caudal de inyección.
- Su radio de acción.

Cuando estas cantidades son constantes, la presión también lo es. Sin embargo, la experiencia dice que la viscosidad de un mortero de B/C aumenta ligeramente con el tiempo, haciendo esto que la presión aumente de igual forma.

Además, es fácil de cometer pequeños errores de dosificación en el momento de la preparación del mortero. Como actúan rápidamente sobre la viscosidad y rigidez, la presión varía más o menos durante la inyección. El diagrama del manómetro acusa fielmente todos estos errores.

La presión de inyección es muy difícil de medir con exactitud. El funcionamiento alterno del inyector provoca vibraciones en el sistema inyector-conducción-terreno. El compresor que acciona el inyector impone también la frecuencia de llenado y vaciado del depósito de aire, por eso, no hay más remedio que conformarse con una presión media. Para que pueda registrarse una presión sensiblemente constante se requiere de un dispositivo especial.

Normalmente las presiones son del orden de 10 a 30 Kg/cm², pero esto no

quiere decir que no se inyecte nunca a 5 Kg/cm^2 o que no se subirá a 80 Kg/cm^2 .

Para un terreno y mortero determinado, la presión viene fijada por el caudal, que puede fácilmente regularse. Esta regulación es cuestión de práctica. No es preciso que el caudal sea muy pequeño, para no aumentar el costo de los trabajos, ni muy grande para no elevar demasiado la presión, corriéndose el riesgo de romper el terreno o de afectar a las construcciones próximas.

AGRIETAMIENTOS PRODUCIDOS POR LA INYECCION.

Esos agrietamientos o roturas producidos por la presión de inyección se subdividen teóricamente en verticales y horizontales.

Siempre que se puedan examinar los efectos producidos por la inyección, debido a la excavación de una obra, se comprueba que esta clasificación es tan clara como parece. A veces, esas roturas tienen tendencia vertical, y otras, tendencia horizontal, pero es difícil clasificar los agrietamientos verticales como favorables y los horizontales como desfavorables o peligrosos. Esto es debido, sin ninguna duda, a la composición heterogénea del terreno, tanto física como mecánica, que debe tener una influencia preponderante, siempre desconocida.

Cada vez que se observa una rotura de este tipo en el curso de un trabajo se detiene la inyección, con el fin de no ensancharla inútilmente. Después del fraguado del mortero, si se juzga necesario, se reanuda la inyección con un mortero más penetrante. Pero tales esfuerzos no siempre son coronados por el éxito, porque el segundo mortero tiene tendencia a reproducir las rotu

ras existentes. Con frecuencia se superponen.

DEFORMACION DEL SUBSUELO.

Ya se ha señalado que los tubos de inyección con manguitos provocan a veces fuertes deformaciones del subsuelo. Estas deformaciones horizontales son debidas a la presión de corriente que se manifiesta durante la inyección. No tienen importancia cuando la inyección se está realizando en terreno virgen, pero si existe en la proximidad de la zona a inyectar un muro de sostenimiento en construcción, edificaciones, etc. es indispensable controlar las deformaciones para mantenerlas dentro de un cierto límite.

Las señales de levantamiento que se observan en el terreno revelan con frecuencia un asentamiento al comienzo de la inyección. Cuando esto suele suceder es que existen aluviones de poca densidad cuyos granos se reagrupan bajo el efecto de la presión de corriente. Al cabo de un cierto tiempo de inyección estos asientos se detienen y comienza el levantamiento, que puede ser relativamente importante, cuando se inyectan sucesivamente numerosos medios que, aunque de poco espesor, en cada uno de ellos se produce un pequeño levantamiento.

Suele ocurrir a veces, que al producirse estas sobreelevaciones del terreno, se arrastra con ellas pilotes o tablestacas situadas en las proximidades; estos movimientos pueden parecer inquietantes, pero se ha demostrado, sin embargo, que han sido cimentadas sin peligro alguno pesadas construcciones en terrenos levantados por las inyecciones.

Entonces es necesario limitar los levantamientos cuando las inyecciones se realizan debajo o muy cerca de construcciones existentes. Esto hace indispen-

sable el uso de una gran variedad de morteros, perforaciones muy próximas y caudales de inyección muy pequeños, con objeto de impregnar el terreno sin que se produzcan agrietamientos; en estos casos el tratamiento es muy costoso.

INYECCION DE CAPAS SUPERFICIALES.

La inyección de las capas superficiales del suelo (de 5 a 8 m de profundidad) no puede hacerse correctamente a causa de las resurgencias que se manifiestan. Elevar la presión es imposible. Hay que conformarse con un relleno más o menos satisfactorio efectuado partiendo de perforaciones de inyección, muy próximos, inyectados a baja presión, o, lo que es preferible, sobrecargar el terreno con un terraplén provisional de unos 5 o 6 m de altura.

La profundidad a la cual comienza a obtenerse un buen rendimiento de la inyección depende de la contextura de los aluviones.

RESURGENCIAS.

Aparecen cuando el terreno está saturado de mortero y suelen localizarse en las proximidades de la pantalla, aunque algunas veces aparezcan más alejadas, 30 o 40 metros, y a veces más.

Para detenerlas es suficiente con interrumpir la inyección durante el tiempo de fraguado del mortero. Si éste tiene una débil rigidez, conviene continuar la inyección, pero empleando un mortero que endurezca enseguida, con el fin de expulsar el mortero poco resistente y después alcanzar el fraguado. Si no se toma esta precaución se corre el riesgo de incrementar las resurgencias al inyectar los próximos tramos.

DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES Y MODO DE REALIZARLAS.

Debido al uso de morteros estables en los aluviones, el diámetro de las perforaciones puede ser cualquiera, sólo se considera el aspecto económico.

Los aluviones son perforados generalmente a percusión, embutiendo un tubo de revestimiento provisional en el terreno. Estas perforaciones son las de menor diámetro admisible porque resultan, por lo general, las más económicas.

Pero a veces no sucede así. Si los aluviones tienen un espesor de varias decenas de metros, la perforación a percusión se encuentra en competencia con la de rotación. Entonces la perforación es de un diámetro relativamente grande, pero esto no complica nada, porque es necesario, con este modo de perforación, colocar un tubo de manguitos en el barreno terminado. Es el único medio para poder colocar los obturadores y, como consecuencia, inyectar el mortero a la profundidad deseada.

CONTROL DE LAS INYECCIONES.

Inyecciones por impregnación: es la que corresponde a la inyección de un macizo fisurado. Las fisuras son obturadas por impregnación del mortero y si se producen ciertos agrietamientos, también quedan rellenos por él.

Ocurre lo mismo con las arenas y gravas cuando se adapta la naturaleza del mortero de inyección a su permeabilidad. Es un método muy costoso, pero el mortero rellena todas los espacios vacíos y los posibles agrietamientos no hacen más que completar una inyección de por sí satisfactoria.

Dicho de otro modo, con la inyección por impregnación quedan rellenos todos los espacios vacíos del terreno. Para controlar la inyección, basta con asegurarse de que el mortero ha penetrado en su totalidad o de que la permeabilidad en diferentes puntos del medio inyectado es suficientemente débil.

Uso de la ENPASOL como control de inyecciones:

- A partir de los parámetros combinados: Establecimiento automático de las - cantidades a inyectar a cada nivel por cada fase de trabajo y por la naturaleza de la lechada.
- Se mantiene un control permanente, a través de histogramas correspondientes a cada fase de trabajo.
- Criterio de recepción, sobre la base de un histograma mínimo impuesto como especificación.

CAPITULO III

METODOLOGIA ESPECIFICA PARA EL TRAMO.

FINALIDAD DE LA INYECCION:

Con este tratamiento se pretende lograr un mejoramiento del subsuelo que permita facilitar los trabajos de excavación del túnel y disminuir las eventuales molestias que puedan causar a las construcciones adyacentes. Específicamente se espera:

- a.- En los terrenos permeables la inyección limitará las entradas de agua en la excavación del túnel y se controlarán así, los consiguientes problemas de erosión, descompresión del terreno y movimientos en la superficie. Para ello, se disminuirán las variaciones del nivel freático, y se evitarán los asentamientos provocados por la consolidación que pueda ocurrir en los terrenos limosos y arcillosos, que normalmente están sumergidos en la capa freática.
- b.- En las arenas limpias, se procura asegurar cierta resistencia mecánica en relación con la resistencia de gel de silicato utilizado para su impregnación.
- c.- En los terrenos arcillosos y limosos que no se puedan impregnar, la lechada B/C, producirá una compresión y por lo tanto, una consolidación en los mismos.

Para definir en forma detallada el tratamiento apropiado a todo lo largo del túnel, se realizará un estudio complementario, antes de comenzar la inyección propiamente dicha, el cual contempla:

- a.- Perforaciones destructivas (40 unidades) con muestreo de pruebas de penetración standard (S. P. T.).
- b.- Sondeos con recuperación de muestras por vibro-hinca (20 unidades) hasta

el mismo nivel.

c.- Perforaciones destructivas con registros de parámetros (10 unidades), ejecutadas al lado de sondeos representativos a lo largo del túnel.

Con los datos obtenidos se suministrará para cada tramo, un plan de trabajo, conteniendo el perfil geológico del sueño, datos de ensayos y su interpretación, y el modo operativo del tratamiento.

MATERIALES:

- Lechada de bentonita-cemento: El cemento utilizado para la preparación de las mezclas será del tipo portland I. La bentonita con un límite líquido mínimo de 300%, y además no debe contener ningún elemento que impida de cualquier manera el fraguado del cemento.

- Gel de Silicato: Los geles de silicato que se usan, son del tipo semiduro, con las siguientes características:

a.- Tiempo de fraguado comprendido entre 50 y 70 minutos, compatible con el tiempo para inyectar el gel. Durante todo el período de la fase líquida, los geles deben conservar una viscosidad leve y sensiblemente constante, lo cual permite garantizar una correcta impregnación.

b.- Viscosidad inicial de 3,5 a 6,0 centipoises y del orden de 10,0 centipoises a los 30 minutos.

c.- Incoloro, inodoro, con densidad de 1,331 a 1,36 gramos por centímetro cúbico aproximadamente.

d.- Temperatura de ebullición 100 °C.

e.- No inflamable ni explosivo.

f.- No debe presentar ningún carácter de toxicidad después de la inyección y endurecimiento del suelo.

g.- El silicato será un silicato de sodio en solución.

h.- El reactivo para el gel es orgánico y asegura una durabilidad equivalente al gel, en cuanto a la permeabilidad.

- Agua: Se utilizará agua potable suministrada por el "Instituto Nacional de Obras Sanitarias" (I.N.O.S.)

EQUIPOS:

- El sistema de inyección a ser empleado tiene capacidad para inyectar un caudal de 10 litros por minuto de solución, desarrollando presiones de 20 Kilogramos por centímetro cuadrado con flujo bajo, a fin de permitir la rotura de la lechada de forro.

- Depósitos de agua con mezcladores, con capacidad suficiente para una operación continua de la bomba; balanza y medidores para determinar las proporciones exactas de los componentes. También se utilizan manómetros, tubos de Policloruro de Vinilo (P.V.C.), mangueras y obturadores dobles. Estos últimos están introducidos en tubos de diámetro constante (figura III-1).

- Equipo de perforación rotativa con sistema de registro de parámetros denominado ENPASOL.

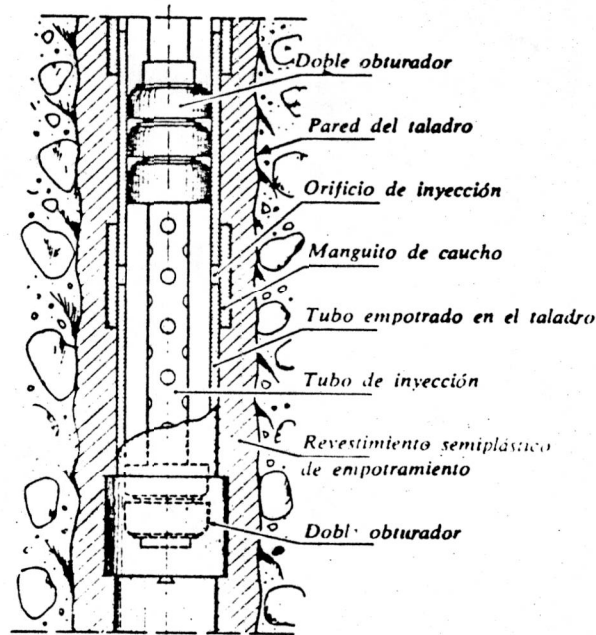


Figura III-1. Doble obturador para la inyección por tubos de manguitos.
(Doc. SOLETANCHE) (Ref. Inyección de Suelos. H. Caribefort)

METODO DE EJECUCION.

Perforaciones:

Las perforaciones se realizan solamente con equipo rotativo con circulación de lodo bentonítico para evitar el ensanchamiento del orificio por desmoronamiento.

Todo el tratamiento se hace desde la superficie con el método de tubos de manguitos. Estos, deben cubrir todo el tramo a inyectar y en lo restante de la perforación será conectado un tubo liso.

Los tubos necesarios para la inyección, se disponen en abanicos paralelos, en proyección horizontal, cuyos planos son perpendiculares al eje del túnel.- Se colocan de tal manera, que en la zona de inyección, la distancia entre ellos

sea de 1.20 metros para el gel, y en las zonas donde solamente el tratamiento sea de B/C dicha distancia puede aumentarse hasta 2.40 metros.

Las inyecciones de lechada B/C y de gel, se realizan manguito por manguito, con cantidades predeterminadas en función de las características del terreno, usando obturadores dobles.

La inyección del silicato de sodio se comienza cuando la lechada B/C alcanza una rigidez suficiente (24 horas).

Control durante el proceso de inyección :

En la central de inyección se dispone de un registrador automático de presiones. Además, para cada tramo de perforación se indica: La naturaleza, caudal, presión y cantidad de solución a inyectar establecido teóricamente. A medida que se inyecta, se verifican cada uno de estos parámetros para tomar las precauciones necesarias en caso de que alguno falle.

Eficiencia de la inyección:

La eficiencia de la inyección se determina a través de perforaciones de control y ensayos de inyección entre dos abanicos inyectados. Con estas pruebas se obtiene información después de ejecutado el tratamiento, para estimar el mejoramiento dado al terreno.

También se toman muestras del suelo tratado, cuando se realizan los primeros trabajos de excavación, éstas son sometidas a ensayos de compresión no confinado, cuyos resultados deberán presentar un esfuerzo mayor a 3.0 Kg/ cm^2 .

Además se realizan ensayos de permeabilidad, los cuales deben arrojar resultados con valores menores a 10^{-6} metros por segundo.

Si los resultados obtenidos en las pruebas no son satisfactorios, se deben realizar inyecciones adicionales hasta cumplir las especificaciones exigidas.

ESTUDIO DEL TRAMO.

Del tramo "La Paz-Silencio", progresivas 14 + 672 hasta la 15 + 010 (figura III-2), se toma para este estudio los abanicos localizados en las progresivas 14 + 754,80 y 14 + 826,80 debido a la similitud de la geología y topografía del terreno, la cual los hace bastante representativos.

GEOLOGIA:

En este tramo el suelo es básicamente arenoso, con una fuerte presencia de limo y en algunos sitios se encuentran bolsones de arcilla; con abundantes pedregales de diversos tamaños de gneis y esquistos. Además se localiza una capa de esquisto sano variable en la profundidad y que hacia el final del tramo no se detecta.

En la progresiva 14+754,80 el nivel del esquisto sano está alrededor de los 19 metros de profundidad. En cambio en la progresiva 14+826.80 no logra ubicarse dicha capa.

TRATAMIENTO DEL TERRENO:

Se inyecta B/C a todo lo largo del tramo, con la siguiente dosificación para un metro cúbico de mezcla:

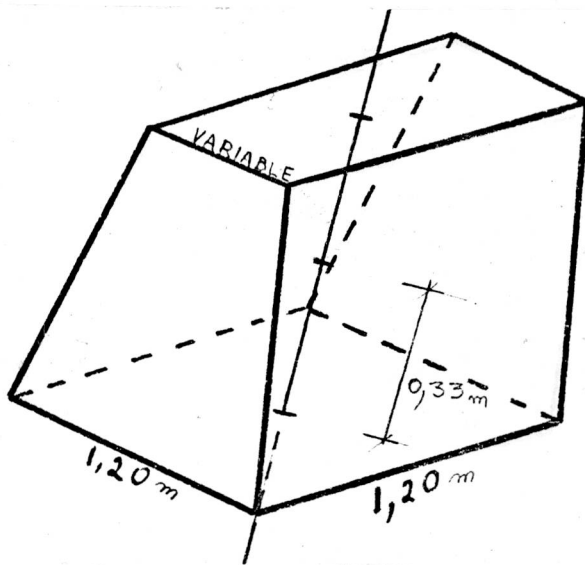
270 Kg de cemento Portland tipo I.

26 Kg de Bentonita.

895 litros de agua.

Inyección del gel: Debido a la geología del terreno se consideraron fundamentalmente dos zonas, una que va desde la progresiva 14+718,00 hasta la progresiva 14+736,20 la cual se inyectó el gel al 35% y otra, desde la progresiva 14+740,40 hasta la 14+766,80 donde se inyectó gel hasta 10%. Se ubicó una zona de transición donde se inyectó gel en la parte superior a 35% y en la parte inferior a 10% (figura .III-3)

FORMA COMO SE DETERMINAN LOS VOLUMENES:



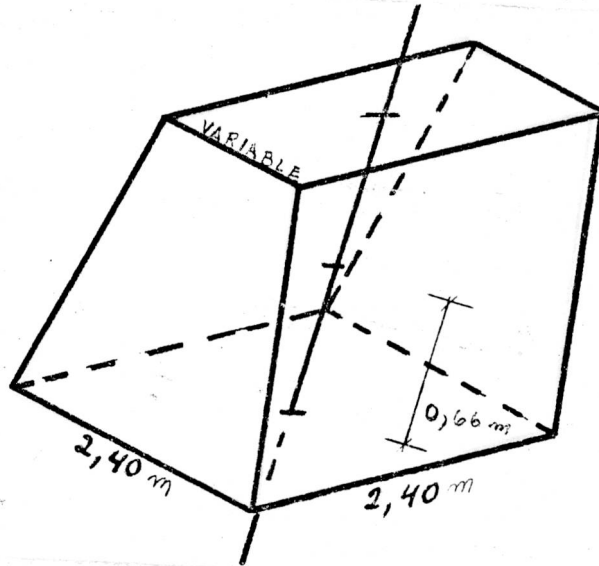
PARA EL GEL :

- El volumen de la pirámide truncada - corresponde al volumen del terreno.
- El volumen de gel a inyectar va en función de un porcentaje del volumen del terreno; específicamente:
 - a.- En arenas y arenas limosas, hasta un 35% del volumen del terreno.
 - b.- En arenas arcillosas, hasta un 10% - del volumen del terreno.

Esos valores son obtenidos en base a la experiencia de inyecciones efectuadas en otros países.

El gel es colocado en el terreno cada 33 cm a lo largo del tubo con manguitos, debido a que su función es impregnar.

PARA LA BENTONITA - CEMENTO



El volumen de B/C a inyectar corresponde, de acuerdo a la experiencia, a un 10% del volumen de la pirámide (volumen del terreno), para suelos aluvionales.

Se coloca en el terreno cada 67 cm a lo largo del tubo con manguitos, ya que su función es rellenar

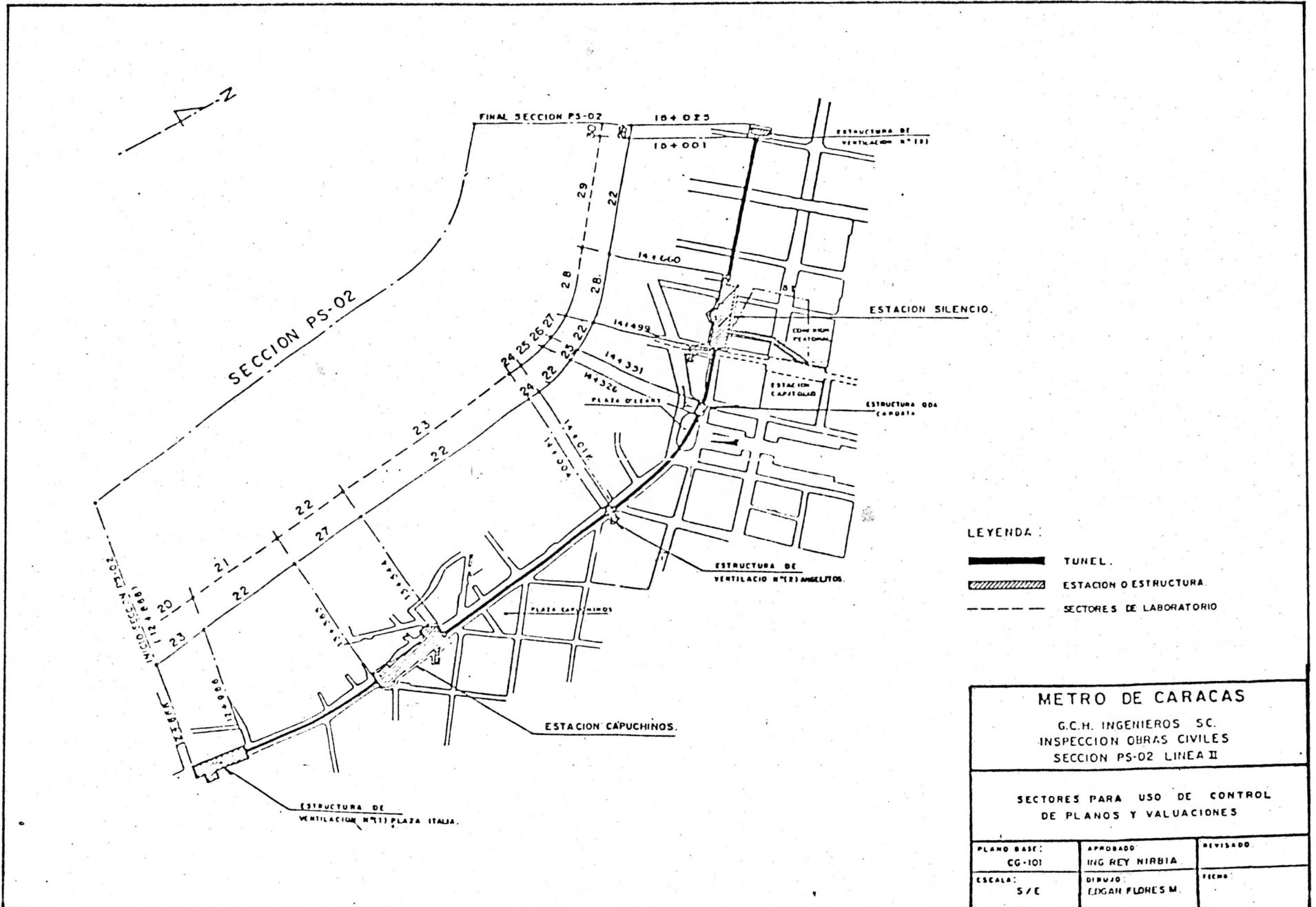
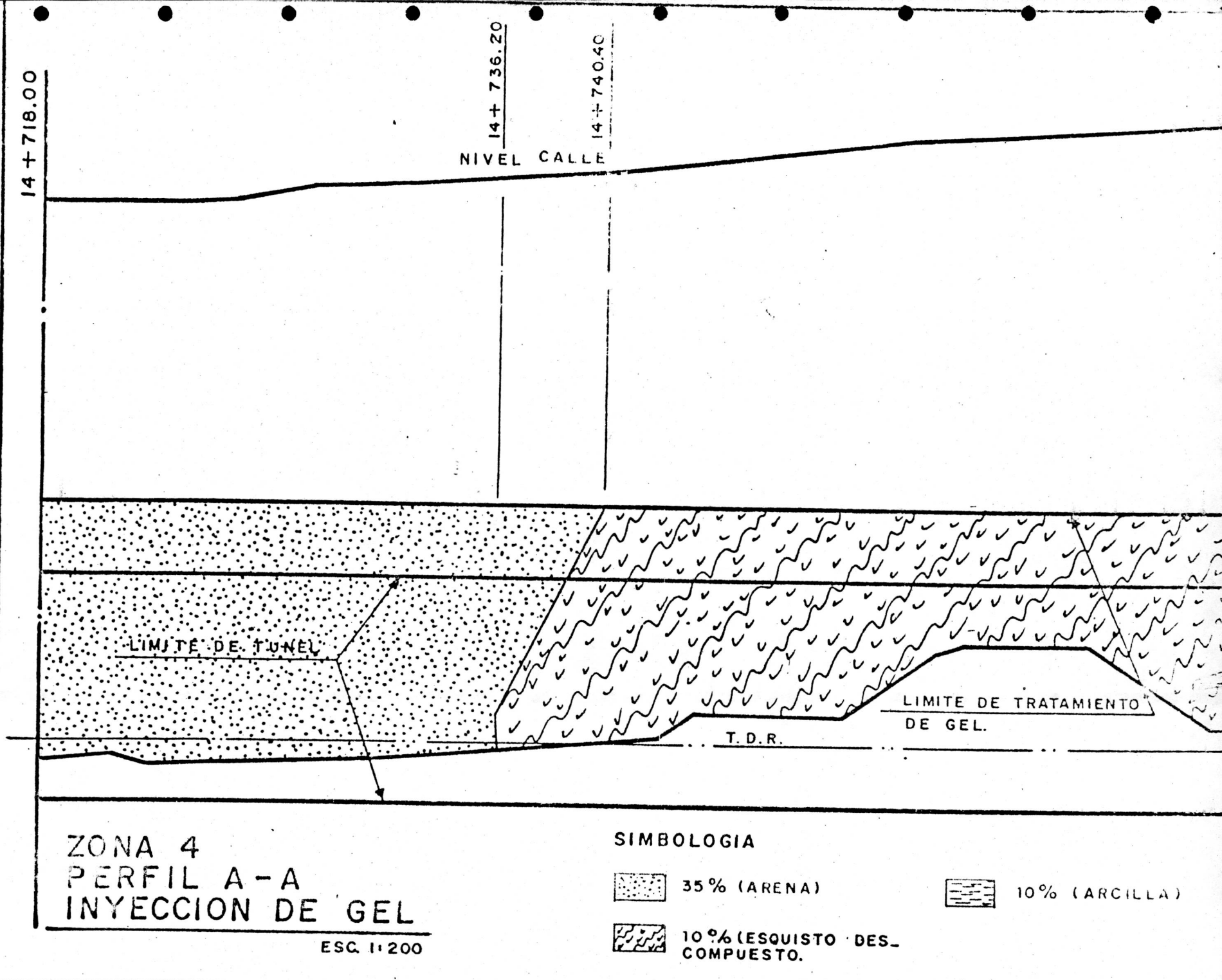



Figura III-2. (Cortesía G.C.H. INGENIEROS)



ZONA 4
 PERFIL A-A
 INYECCION DE GEL

ESC. 1:200

SIMBOLOGIA

-  35% (ARENA)



 10% (ESQUISTO DES. COMPUESTO.)
-  10% (ARCILLA)

Figura III-3.

Factores a considerar para la ubicación de las perforaciones:

- Alcance radial de la lechada, para determinar la separación entre ellos.
- Servicios públicos existentes conocidos, ya que restringe la colocación de los barrenos dentro del abanico.

En este tramo la distancia entre abanicos es constante, 1.20 m, debido a que el alcance radial del mortero es de 60 cm.

En la figura III-4, puede observarse la ubicación de los abanicos, así como los sitios donde se hicieron los registros de parámetros (R.P.) antes y después de la inyección, y también la ubicación donde se realizó las pruebas de permeabilidad.

La vista en perfil, se observa en la figura III-5A y figura III-5B, que además da la información geológica.

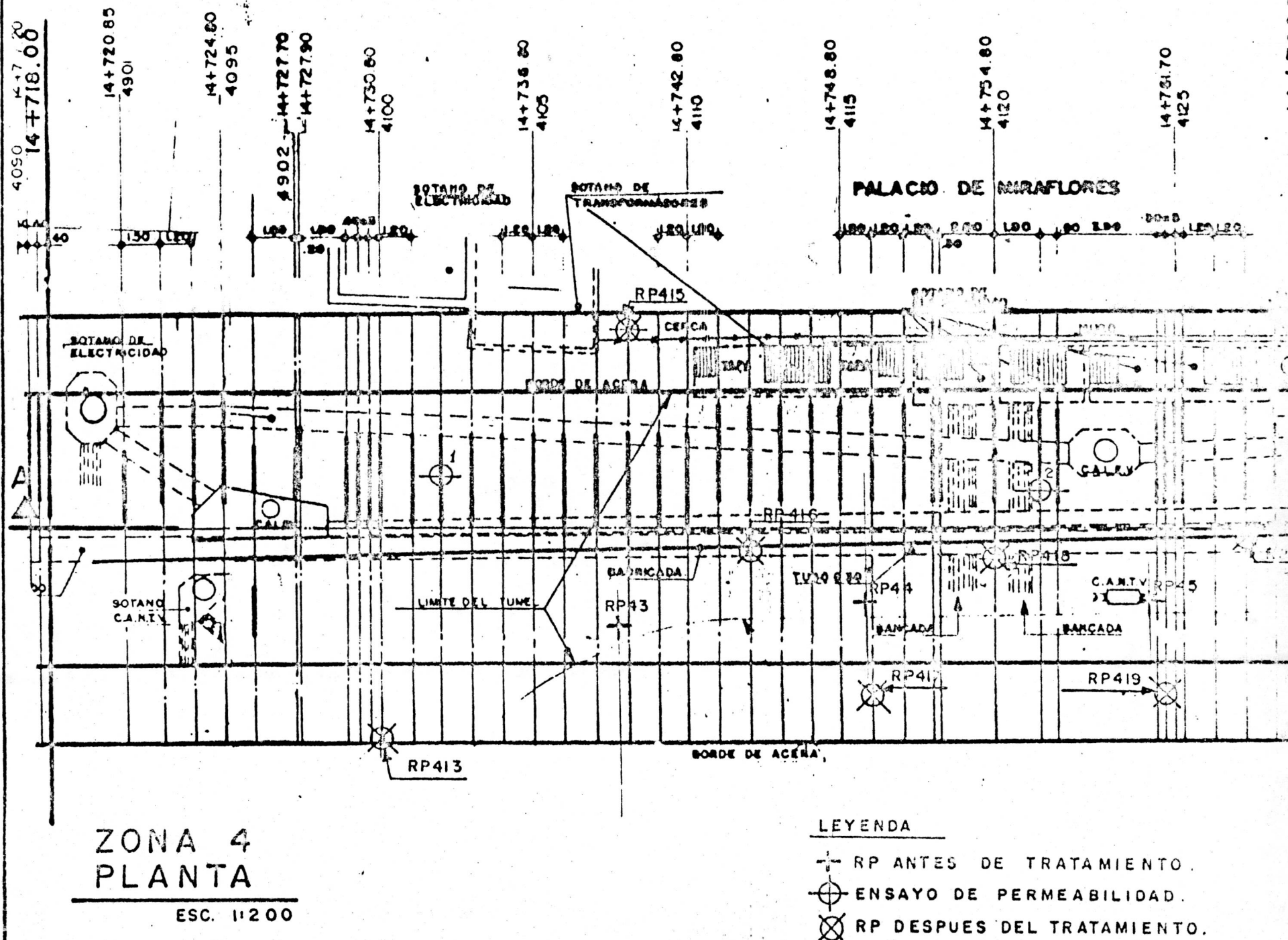
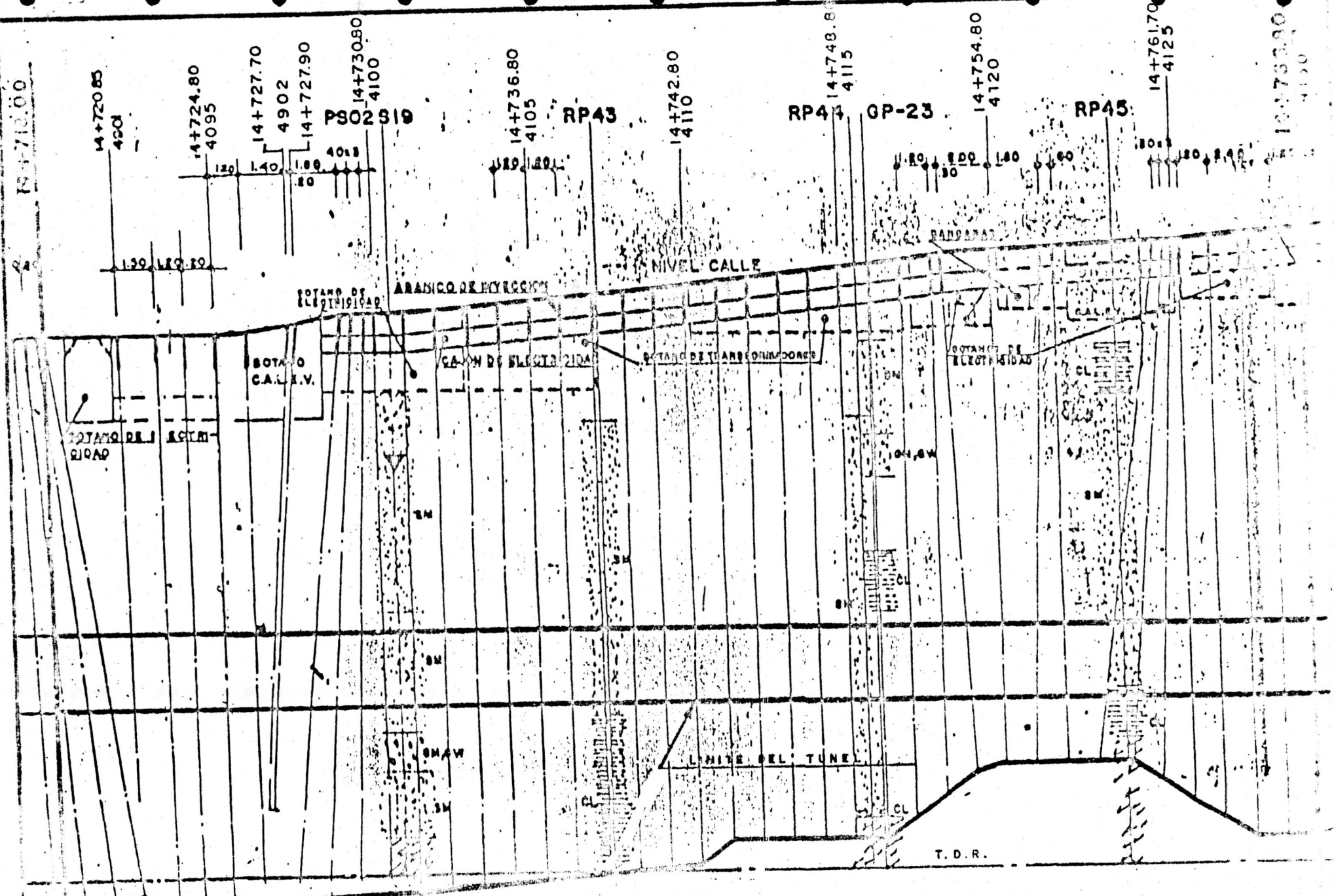


FIGURA III-4.



ZONA 4
PERFIL A-A

ESC. 1:200

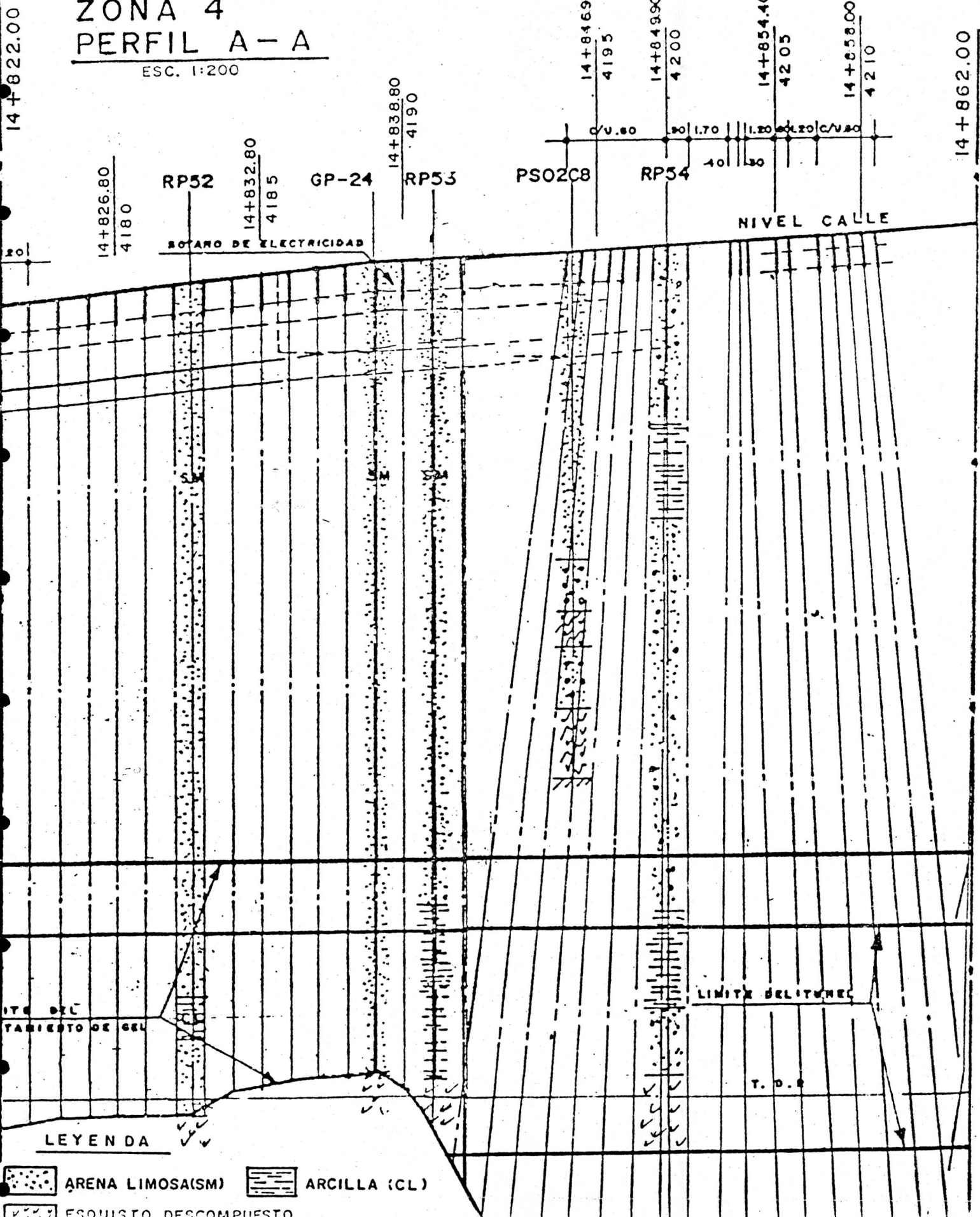
LEYENDA

- | | | | |
|--|----------------------------------|--|-----------------------|
| | ARENA LIMOSA (SM) | | ARCILLA (CL) |
| | MEZCLA DE GRAVA Y ARENA (GM, GW) | | ESQUISTO DESCOMPUESTO |

FIGURA III-5A.

ZONA 4 PERFIL A-A

ESC. 1:200



14+826.80
4180

RP52

14+832.80
4185

GP-24

14+838.80
4190

RP53

PS02C8

14+846.90
4195

14+849.90
4200

RP54

14+854.40
4205

14+858.00
4210

14+862.00

ROTAMO DE ELECTRICIDAD

NIVEL CALLE

ITE DZC
TARIENTO DE GEL

LIMITE DEL TUNEL

T. D. P.

LEYENDA

- ARENA LIMOSA (SM)
- ARCILLA (CL)
- ESQUISTO DESCOMPUESTO

FIGURA III-5B.

ANALISIS DE RESULTADOS.

Se consideraron los abanicos 4120 y 4180, tomando dos perforaciones de cada uno de ellos.

REGISTROS DE PARAMETROS ANTES DE LA INYECCION:

Abanico 4120 - Perforación G (gráfico III-1).

En los primeros tres metros se tienen velocidades de penetración muy altas con un empuje casi nulo; torque y presión de agua baja, que indica la presencia de una capa de suelo muy permeable.

La velocidad, torque y empuje refleja que dicha capa posee características mecánicas muy deficientes.

En los siguientes dieciseis metros, el empuje se mantiene casi constante, excepto en los sitios donde están localizados los peñones que se manifiesta con saltos en la gráfica. El suelo mantiene las mismas características de permeabilidad y el torque se mantiene más o menos constante. Es hasta aquí donde el suelo es arenoso con marcada presencia de peñones.

A partir de los diecinueve metros de profundidad hay un incremento de todos los parámetros pero no en forma constante, lo cual indica la presencia de un suelo de mejores características mecánicas. Esto corresponde a la capa de esquisto descompuesto.

METRO DE CARACAS

Forage: 4120 G *

Progresiva 14+754.80

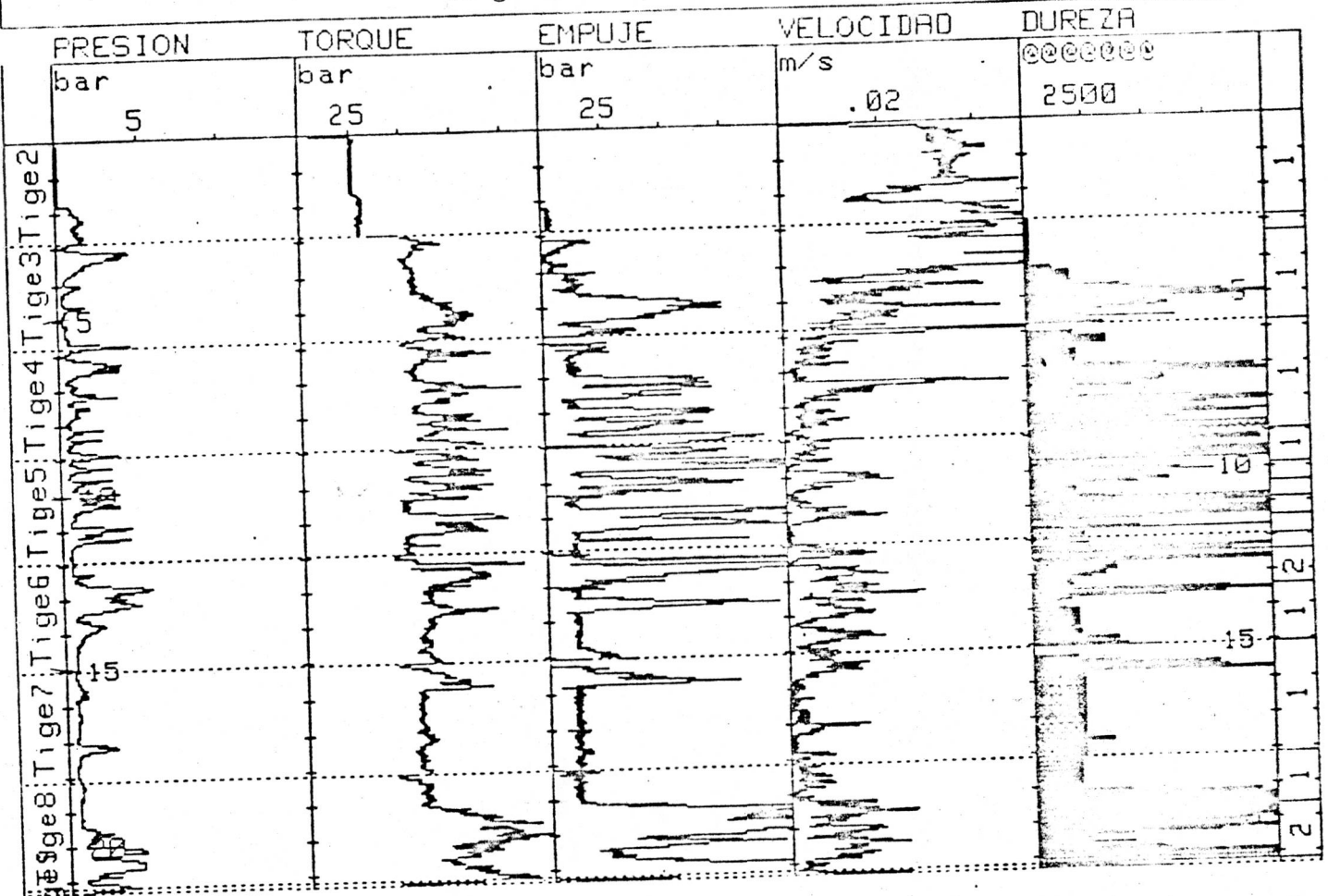


GRAFICO III- 1.

Abanico 4120- Perforación K.(Gráfico III-2).

En esta perforación, el torque se mantiene más o menos constante de principio a fin. La presión de agua es baja con pequeños incrementos entre los nueve y once metros, trece y catorce metros y dieciocho y veinte metros, que indica tramos de menor permeabilidad.

A diferencia de la perforación G, en los primeros dos metros y medio, existe un empuje inicial que se hace casi nulo de allí hasta los cuatro metros, debido a la presencia de un estrato de arena suelta; además, se puede observar que entre los ocho y doce metros hay un incremento notable en el empuje con velocidad baja, lo que permite identificar una mejor compacidad.

En general se puede afirmar que esta perforación presenta características muy similares a la anterior; esta similitud era de esperarse, debido a que ambas pertenecen a un mismo abanico y se encuentran muy próximas.

METRO DE CARACAS

Forage: 4120 K *

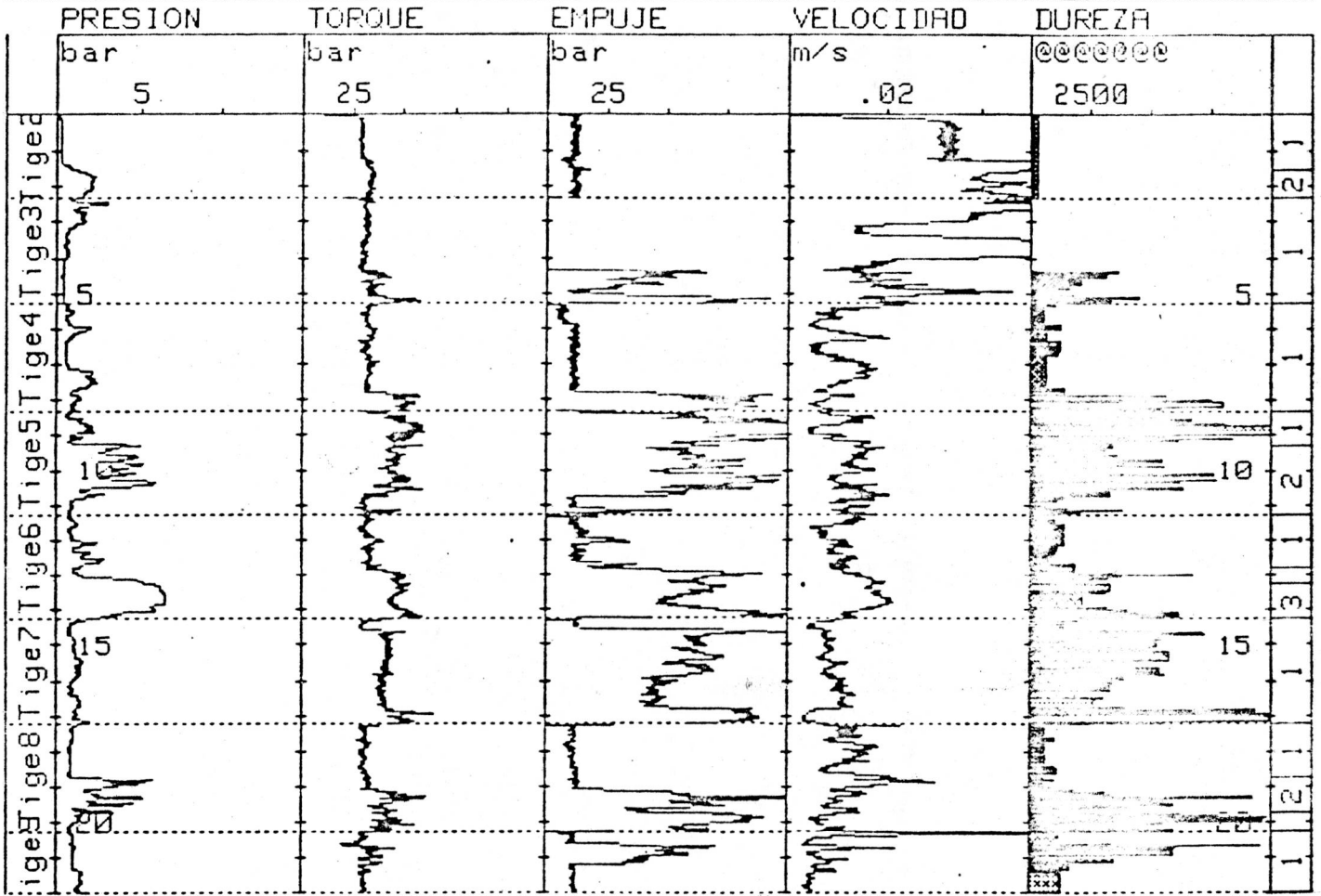


GRAFICO III-2.

7

PROCESO DE INYECCION.

Abanico 4120-perforación K:

Como no se tienen registros de los volúmenes inyectados en la perforación K, se utilizarán los de la A, para efectos de estudio; debido a la proximidad entre ambas.

Esta perforación tiene una longitud de 22.0 m y consta de 17.33 m de tubo liso y 4.67 m de tubo de manguito. Es la segunda de derecha a izquierda en el abanico 4120 (gráfico III-3).

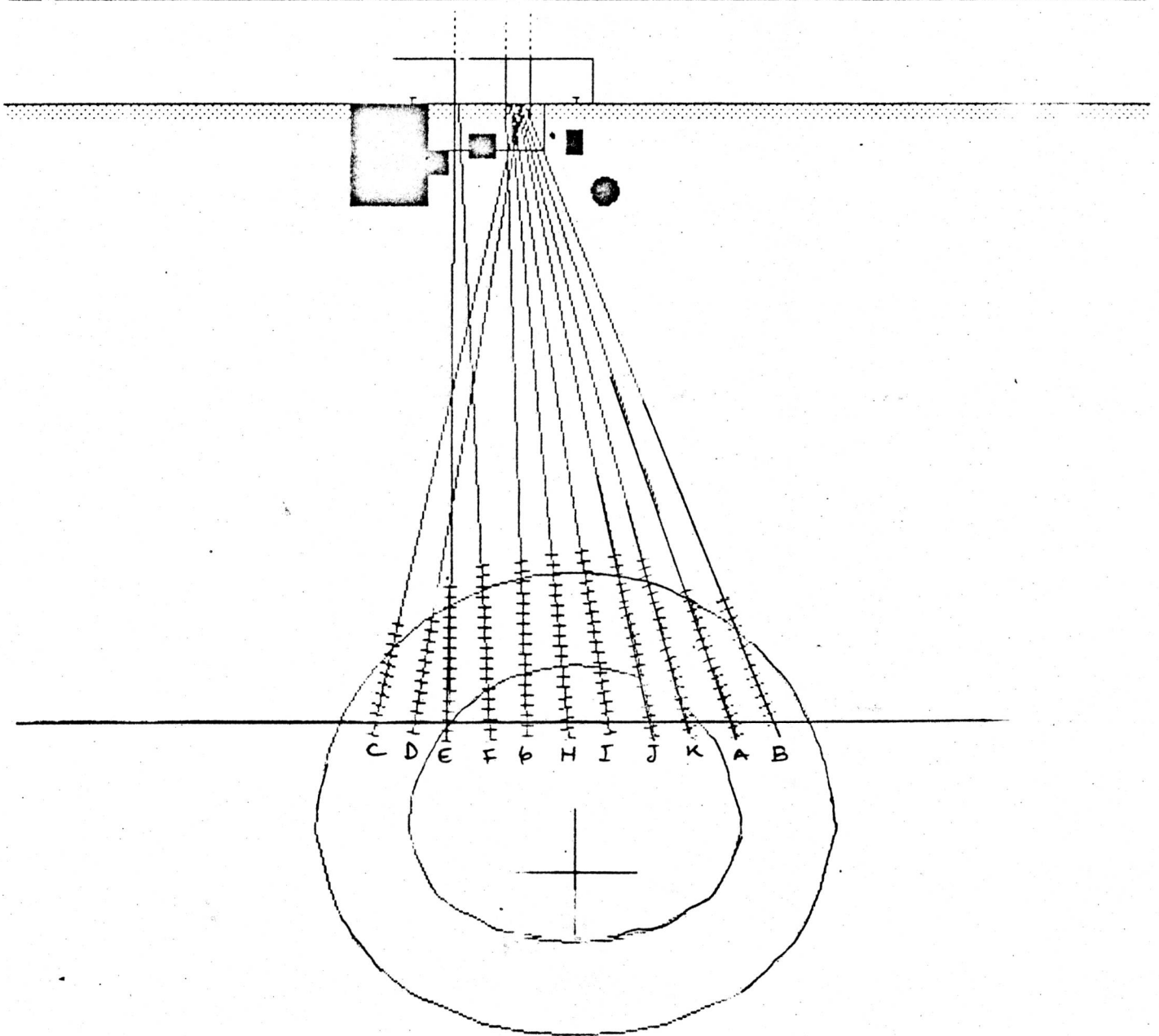
Los volúmenes inyectados de B/C, están descritos en la tabla III-1. Como puede apreciarse el volumen teórico es de 1260 litros y el efectivo es de 880 litros; esto representa el 70% de la mezcla original y es inyectado con obturación cada 0,67 m .

La diferencia entre el volumen teórico y el efectivo se debe a:

- a.- Comunicación con el pozo 4120-C en el tramo 20.00 - 19.33.
- b.- Fuga por la boquilla en los tramos 19.33 - 18.67 y 18.67 - 18.00; en el primero sólo se inyectaron 40 litros donde el volumen teórico era de 220 litros y en el segundo, el volumen teórico es de 200 litros y no hubo aceptación de lechada.

Se presume que dichas fugas son causadas por la presencia de peñones alrededor de los manguitos, que ofrecen barrera al paso del mortero.

En estas circunstancias, se detiene la inyección y se pasa al tramo inmediato para continuar el tratamiento.



escala 1/200°

GRAFICO III - 3.

DESCRIPCION DE LAS PERFORACIONES						
	N.º PERFORACION	EJE ROT. MAQUINA	ANGULO (grados)	PROFUND. (m)	TUBO MANGUITOS	TUBO LISO
1	C	1	-0.5	20.67	5.00	15.67
2	D	1	3.0	20.67	5.67	15.00
3	E	2	2.0	20.52	5.67	14.85
4	F	2	5.5	20.67	6.00	14.67
5	G	2	9.0	20.67	6.00	14.67
6	H	2	12.5	21.00	6.00	15.00
7	I	2	15.5	21.33	6.00	15.33
8	J	2	19.0	21.67	5.33	16.34
9	K	2	22.0	22.00	4.67	17.33
10	A	3	-13.0	21.00	3.67	17.33
11	B	3	-9.7	20.67	3.67	17.00

TOTAL LONGITUD DE LAS PERFORACIONES (m).....: 230.87
 TOTAL LONGITUD DE TUBO DE MANGUITOS (m).....: 57.63
 TOTAL LONGITUD DE TUBO LISO (m).....: 173.19

CONSORCIO
SOLETANCHE-BACHY

Metro de Caracas
Abanico: 4120 (Prog. 14+754.80)
PERFORACION: A

HOJA DE INYECCION.

BOMBA Nº 1

MEZCLA: B/C

OBTURADOR : .67 m

FECHA	Profund. del Obturad.	Cantidad (l)		Presión máxima. (bars)	OBSERVACIONES
		Teórico	Efectivo		
20.67					
20.00		40	40		
19.33		220	220		Se comunicó con 4120-C
18.67		220	40		Fuga por la boquilla
18.00		200	0		Fuga por la boquilla
17.33		200	200		
16.67		200	200		
16.00		180	180		

G.C.H.I.	OCIMECA	
----------	---------	--

Volumen teórico de mezcla: 1260 l

Volumen efectivo de mezcla: 880 L

70%

TABLA III - 1.

En cuanto a presión se refiere (gráfico III-4), la misma osciló entre 18 y 32 bar. Este es un caso particular, ya que se utilizan presiones por encima del límite establecido (20 bar); esto se debe al rechazo del suelo (esquisto descompuesto) a la penetración de la lechada, por lo que fué necesario - incrementarla paulativamente hasta lograr su aceptación sin ocasionar deformaciones excesivas que pusieran en peligro las construcciones adyacentes.

Luego de 24 horas, tiempo de fraguado de la B/C, se inyecta el gel de silicato en todos los abanicos y cada uno de los barrenos.

Los volúmenes de gel inyectados en la perforación A, están descritos por tramo en la tabla III-2; se puede apreciar en ésta, que el volumen programado fué inyectado totalmente sin ningún problema, a excepción de las altas presiones requeridas sólo para romper el recubrimiento(gráfico III-5)

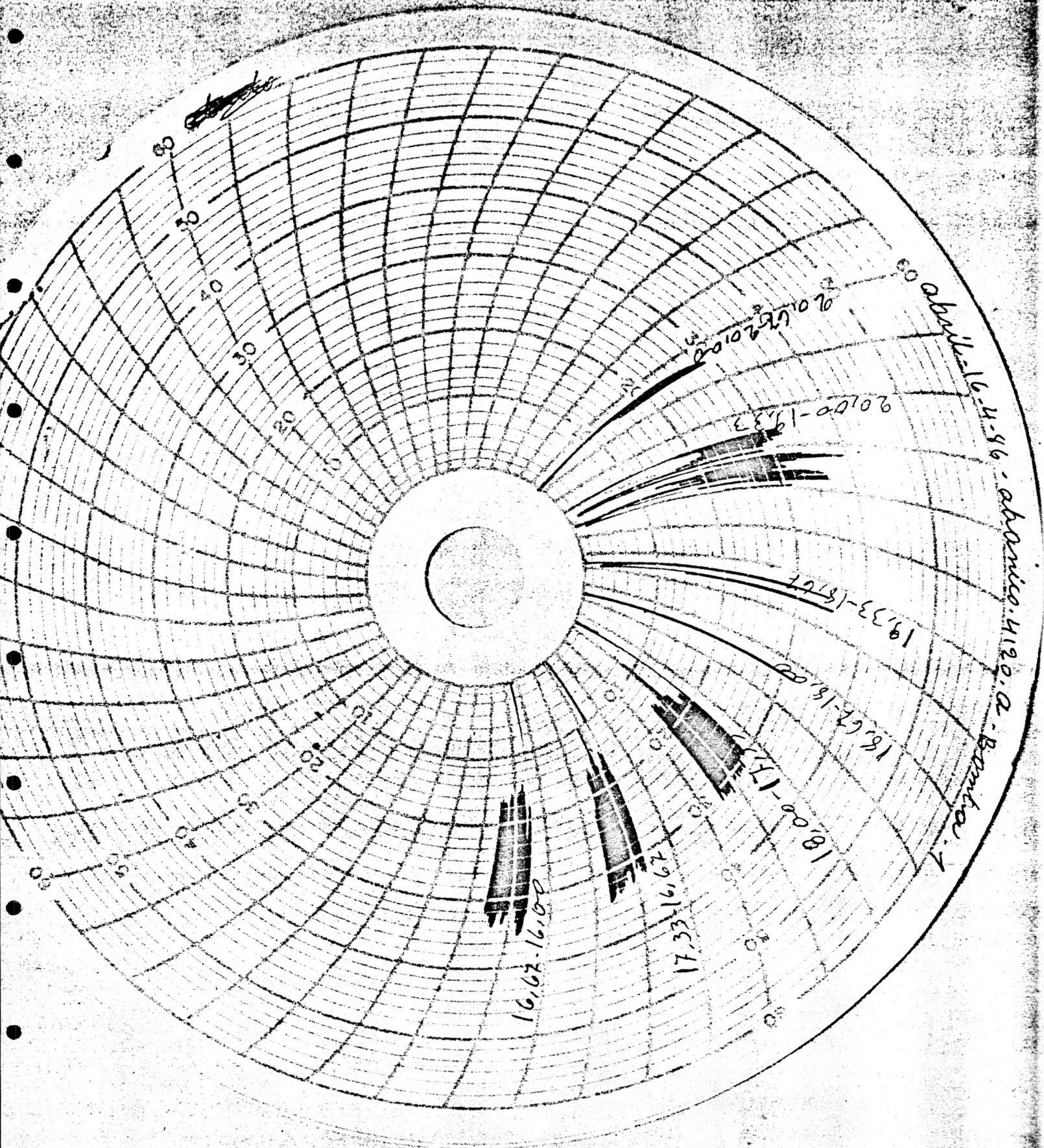


GRAFICO III-4.

CONSORCIO
SOLÉTANCHE-BACHY

Metro de Caracas
Abanico 4120
Perforación : A

HOJA DE INYECCION.

BOMBA Nº 1

MEZCLA: GEL

OBTURADOR : .33 m

FECHA	Profundid. del Obturador	Volumen (l)		Presión máxima (bars)	OBSERVACIONES
		Teórico	Efectivo		
24-04-86					
	21.00	60	60		
	20.67	60	60		
	20.33	60	60		
	20.00	60	60		
	19.67	60	60		
	19.33	60	60		
	19.00	60	60		
	18.67	60	60		
	18.33	60	60		
	18.00	60	60		

Volumen teórico de mezcla : 540 l

Volumen efectivo de mezcla: 540 l

TABLA III - 2.

23. 04. 86. Pozo 4120 A Bomba 1 6el Turno dia

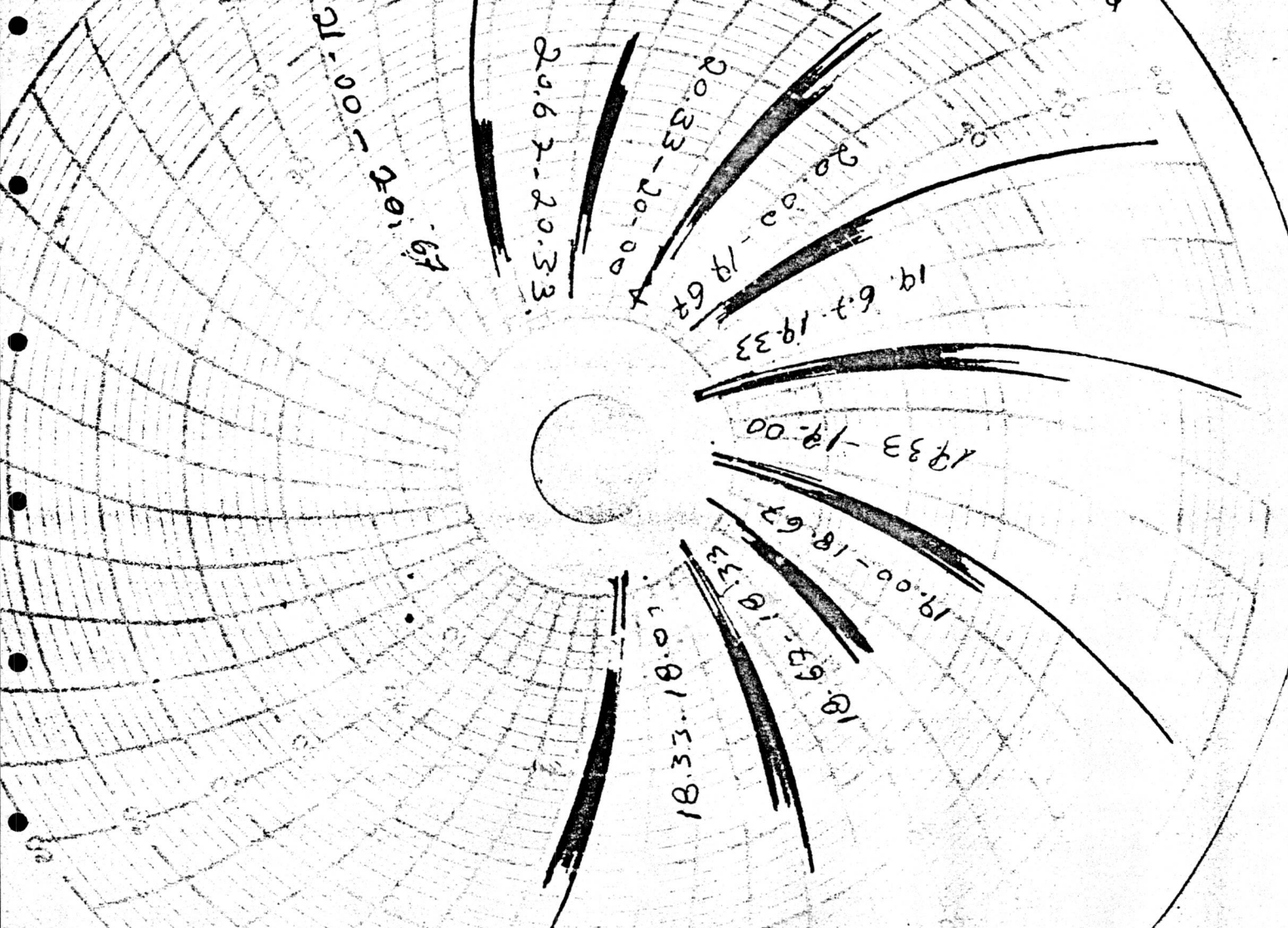


GRAFICO III - 5.

Perforación G:

Esta perforación tiene una longitud de 20.67 m y consta de 14.67 m de tubo liso y 6.00 de tubo de manguito (gráfico III-3).

Los volúmenes de B/C están descritos por tramo en la tabla III-3. Como puede apreciarse, el volumen teórico es de 2020 litros y el efectivo en la primera fase, fué de 720 litros, lo cual representa un 36% de la mezcla original. Esto motiva a pensar en una reinyección; que posteriormente fué decidida estudiando el comportamiento de las demás perforaciones (tabla III-3).

En esta segunda fase, se logró inyectar 520 litros que sumado al volumen de la primera fase, representa el 61% del total.

la diferencia entre el volumen teórico y el efectivo de la primera etapa se debe a:

a.- Fuga por la boquilla en los tramos comprendidos entre 20.67 hasta los 17.33 m, inyectándose en cada tramo, volúmenes muy por debajo de los programados, a excepción de los tramos entre 19.33 m hasta los 18.00 m donde no hubo aceptación de lechada. Se presume las mismas causas del caso anterior y se detiene la inyección.

b.- Comunicación con el pozo 4120 - E en el tramo 16.67 - 16.00.

En estas circunstancias se procede como en el caso anterior.

En cuanto a presión se refiere, en la primera fase (gráfico III-6), la misma osciló entre 2 bar y 25 bar, manteniéndose más o menos dentro del rango

CONSORCIO
SOLETANCHE- BACHY

Metro de Caracas
Abanico : 4120
Perforación: G

HOJA DE INYECCION

BOMBA N° 3

MEZCLA : B/C

OBTURADOR : .67 m

FECHA	Profundidad del Obturador	SOLUCION (1)		Presión máxima (bars)	OBSERVACIONES
		Teórico	Efectivo		
24-3-86					
	21.33				
		80	80		
	20.67				
		300	60		Fuga por la boquilla
	20.00				" " " "
		300	20		" " " "
	19.33				" " " "
		280	0		" " " "
	18.67				" " " "
		280	0		" " " "
	18.00				" " " "
		260	40		" " " "
	17.33				
		260	260		Comunicó con 4120 E
	16.67				
		260	260		
	16.00				

Volumen teórico de mezcla : 2020 l

Volumen efectivo primera fase: 720 l (36%)

Volumen efectivo segunda fase: 520 l

% de volumen inyectado respecto al programado = 61%

TABLA III - 3.

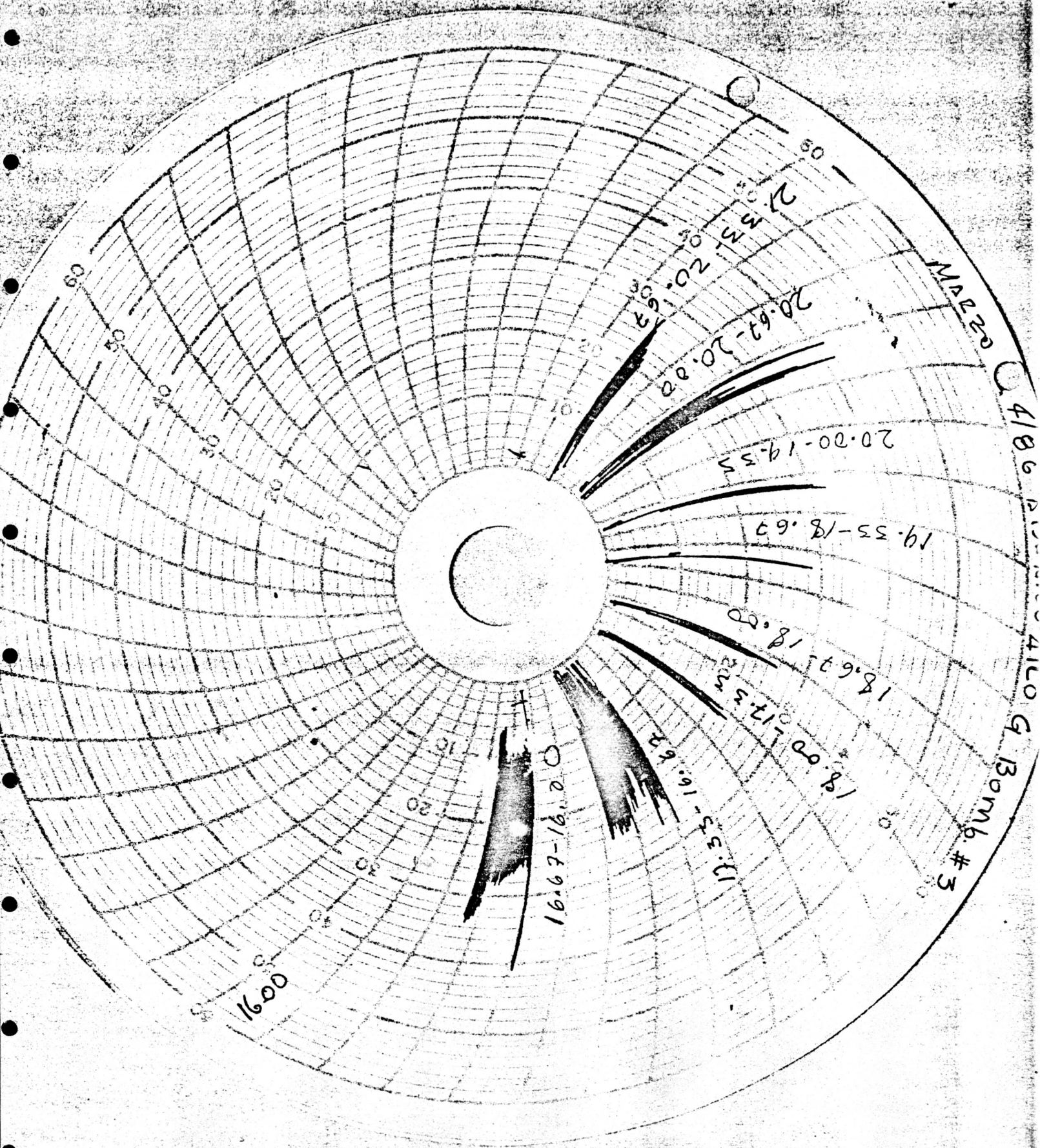


GRAFICO III- 6.

establecido.

En el mismo gráfico se observa que en los tramos donde hubo rechazo total de la lechada, la presión máxima estuvo alrededor de los 30 bar.

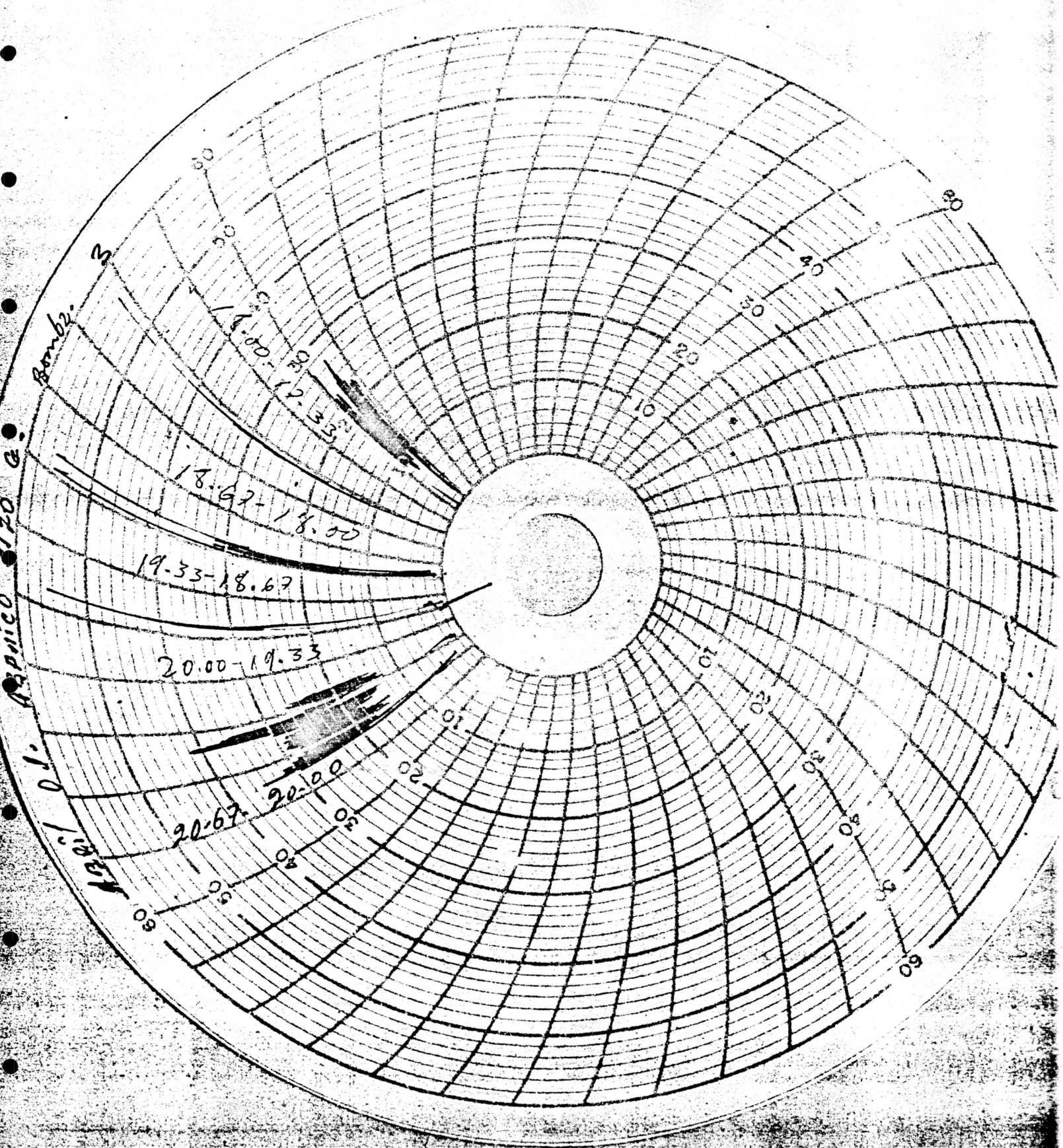
En la segunda fase de inyección (gráfica III-7), las presiones para dichos tramos se elevaron hasta 57 bar, sin lograr mayor aceptación de lechada, lo que permite pensar que existe un material muy rígido que impide el paso del mortero. Por otra parte, en el tramo 20.67 - 20.00, la presión varió de 15 bar a 28 bar y en el tramo 18.00-17.33, varió de 10 bar a 22 bar.

Luego del tiempo de fraguado de la B/C, se inyecta el gel de silicato en todos los abanicos y en cada uno de los barrenos.

Los volúmenes de gel inyectado, están descritos por tramo en la tabla III-4. Se puede apreciar en ésta, que el volumen programado fué inyectado totalmente, sin ningún problema; a excepción de las altas presiones requeridas para su inyección (gráfico III-8), porque se pensaba que en este sitio existía arena arcillosa.

Una vez comenzada la excavación del túnel, se notó la existencia de muchas filtraciones, lo que originó un nuevo estudio de las características del terreno, determinandose que éste se trataba de un suelo predominantemente arenoso. Esto condujo a la realización de una segunda fase de inyección que completara el 35% del volumen del terreno (tabla III-5).

GRAFICO III - 7.



BOMBA Nº : 3
MEZCLA.....: GEL

OBTURADOR : .33 (m)

Pagina: 1

Fecha Turno y Respons.	Profond del Obturad	Candidad (l)		Presion maxi (bars)			OBSERVACIONES
		Teorico	Effect.	10	20	30	
23-4-86 NOTURNO BENCOMO GUERRA SILVESTRE 2.50 AM G. C. H. I. M. P. M.	18.67						
		40	40				
	18.34						
		60	60				
	18.00						
		60	60				
	17.67						
		60	60				
	17.34						
		40	40				
	17.00						
		40	40				
	16.67						
	40	40					
16.34							
	40	40					
16.00							
	40	40					
15.67							
	40	40					
15.34							

FINALIZO A LAS 4.23 A.M.

G.C.H.I.	OCIMECA	
----------	---------	--

NOTA: La firma de la Inspeccion sirve solamente como aprobacion inicial de las cantidades de obra

Volumen teor. de mezcla: 460 (l)

Volumen eff. de mezcla: 460 (l)

100%

TABLA III - 4.

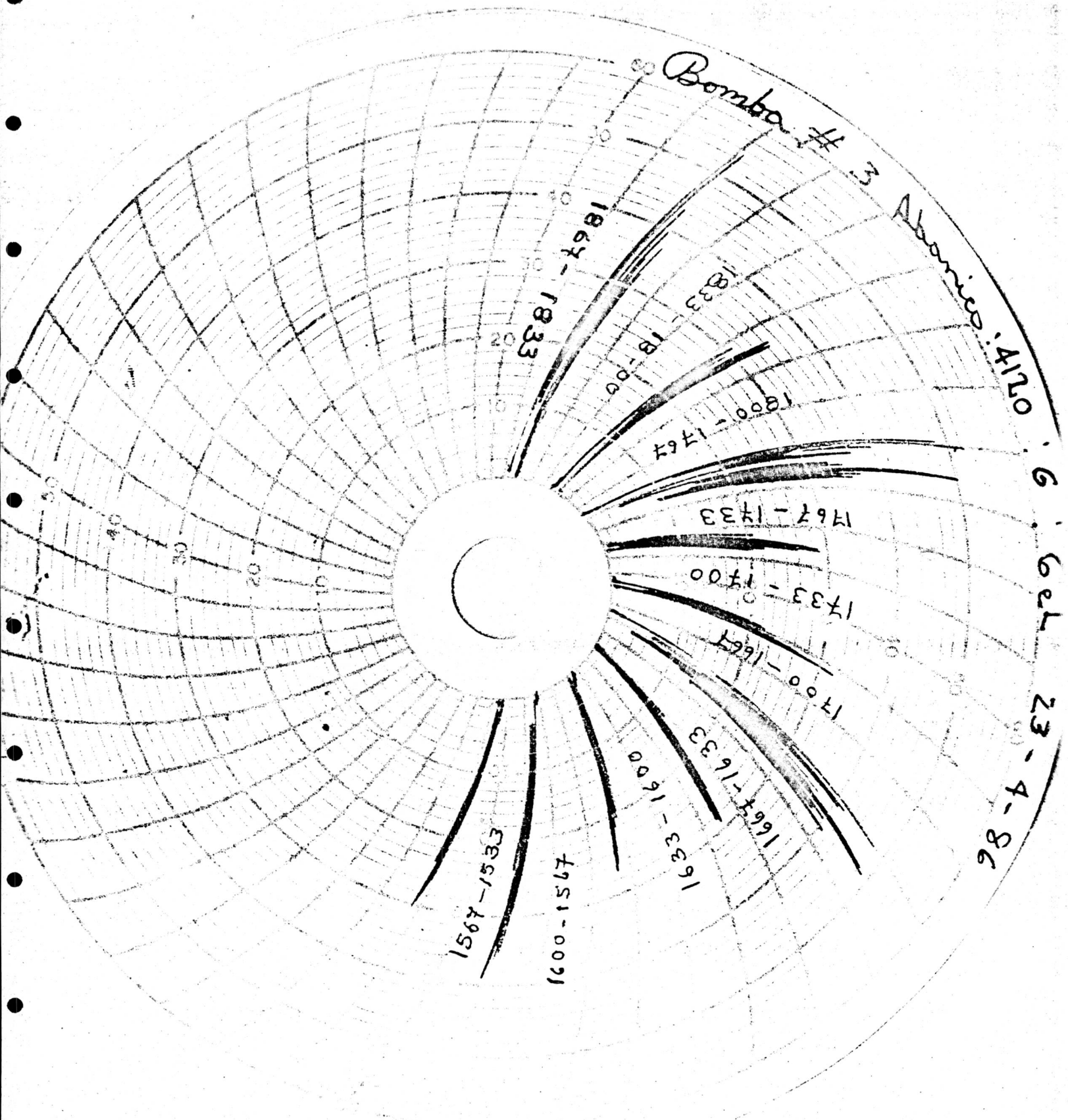


GRAFICO III-8.

CONSORCIO
SOLETANCHE-BACHY

Metro de CARACAS
ABANICO : 4120 (PROG. 14+754.80)
PERFORACION : G

HOJA DE INYECCION

BOMBA N° : 2
MEZCLA....:GEL

OBTURADOR : .33 (m)

Página: 1

Fecha Turno y Respons.	Profond del Obturad	Candidad (l)		Presion maxi (bars)			OBSERVACIONES
		Teorico	Efecti.	10	20	30	
7 8-86	18.67	60	6	447	-	450	
Diagnos CORTESIA PENCION	18.34	120	120	453	-	507	FUGA BUB.
	18.00	120	120	508	-	523	Se convino con el 4120 I
	17.67	120	32	524	-	530	F. Boy.
	17.34	120	120	532	-	543	
	17.00	120	120	545	-	559	
	16.67	120	120	602	-	620	
	16.34	120	120	623	-	640	
	16.00	120	120	725	-	755	
	15.67	120	120	800	-	815	
	15.34						

castaur@soletanche

G.C.H.I.

OCIMECA

NOTA: La firma de la Inspeccion sirve solamente como aprobacion inicial de las cantidades de obra

Volumen teor. de mezcla: 1140 (l)

Volumen eff. de mezcla: 998 (l)

01-08-86

02-08-86

88%

INYECCION: 18.67-16.00

INYECCION: 16.00-15.34

Diagnos

Diagnos

TABLA III - 5.

En la tabla III-5, se puede observar que la aceptación de los volúmenes corresponde exactamente al de un suelo arenoso, inyectándose en un 88% del volumen teórico. Lo mismo se puede apreciar con las presiones, las cuales fueron normales para lograr la impregnación para este tipo de suelo (gráfico III-9)

La efectividad de esta reinyección fué comprobada con el avance de la excavación del túnel basada en una disminución notable de las filtraciones dentro del mismo.

REGISTROS DE PARAMETROS DESPUES DEL TRATAMIENTO.

BENTONITA - CEMENTO :

Como se puede observar en el gráfico III-10 y en el gráfico III-11, el mejoramiento del terreno es bastante notable en todos los parámetros.

En la columna de presión de agua se aprecia un aumento en la zona tratada - que refleja mejoría en la impermeabilidad. El torque se incrementó al doble, - lo que indica mayor cohesión; que además se verifica en las columnas de empuje y velocidad.

Cabe destacar que hubo un mejoramiento del terreno en la parte no tratada, - ya que se produce una compresión por presiones ascendentes que ejerce la lechada sobre el terreno.

GEL DE SILICATO:

A pesar de la inyección del gel, se aprecia en la columna de presión de agua de los gráficos III-12, III-13 y III-14, que no hay un incremento considerable

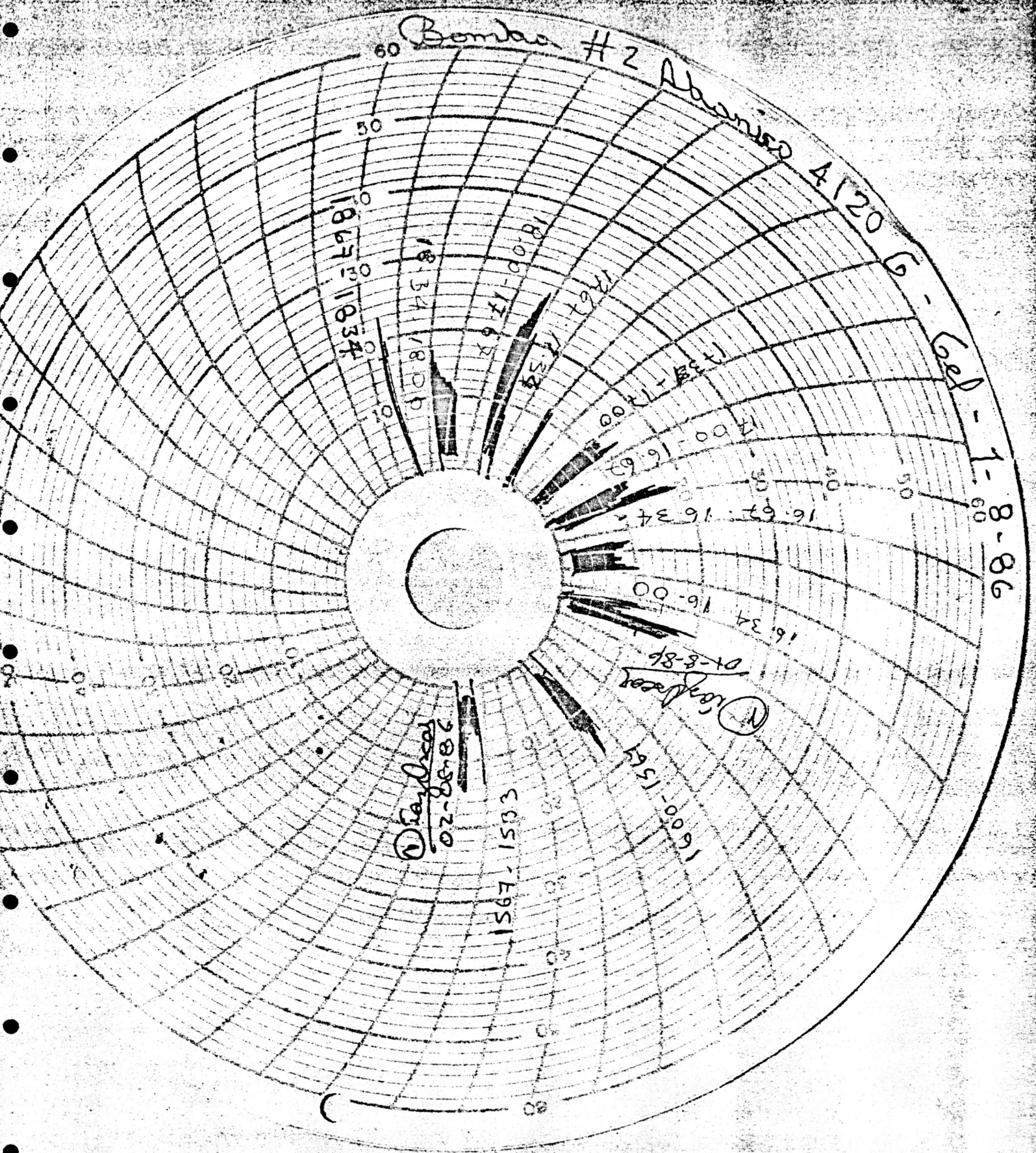


GRAFICO III - 9.

METRO DE CARACAS

Forage: 4120 A **

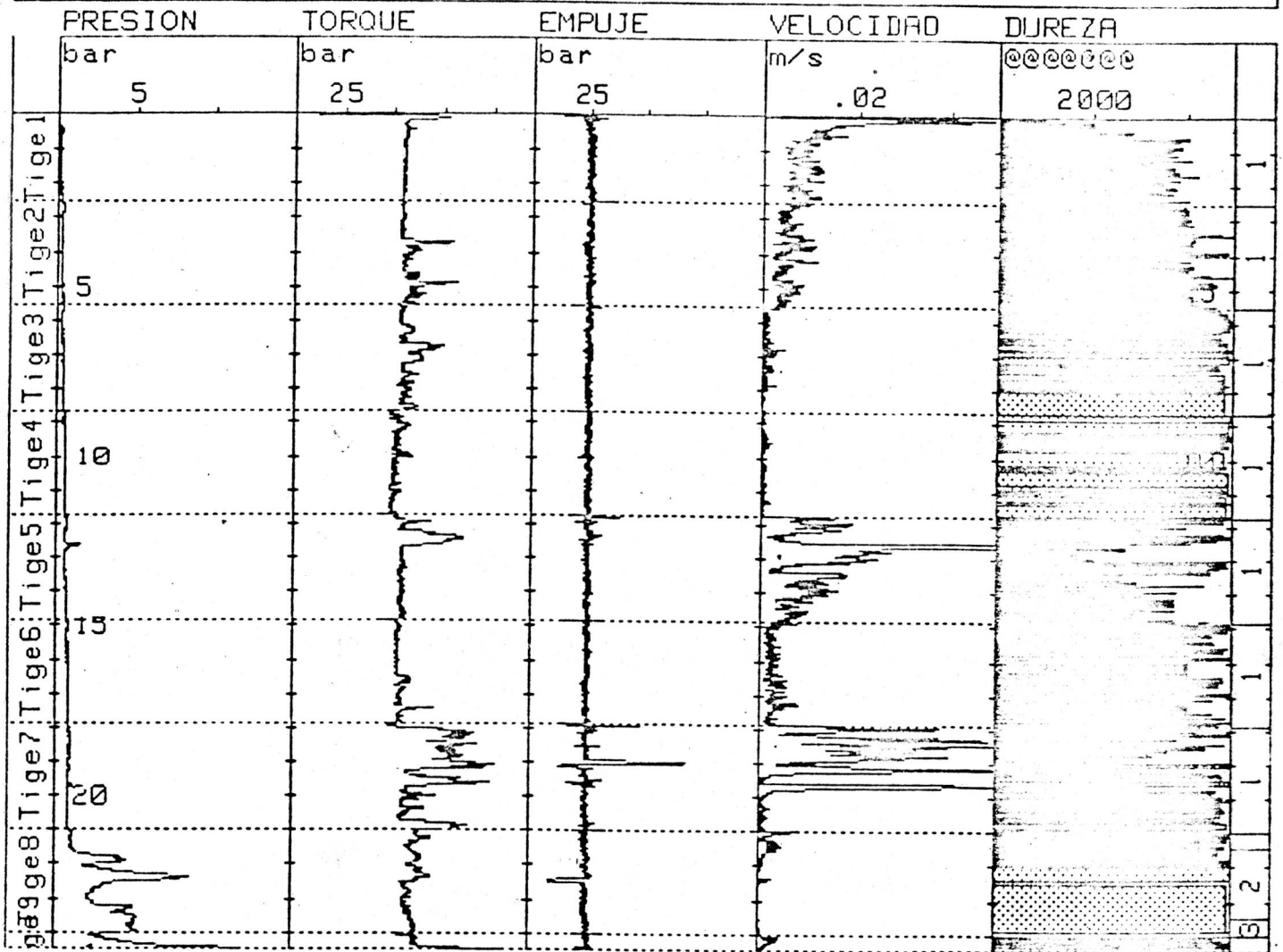


GRAFICO III - 10.

METRO DE CARACAS

Forage:4121 J **

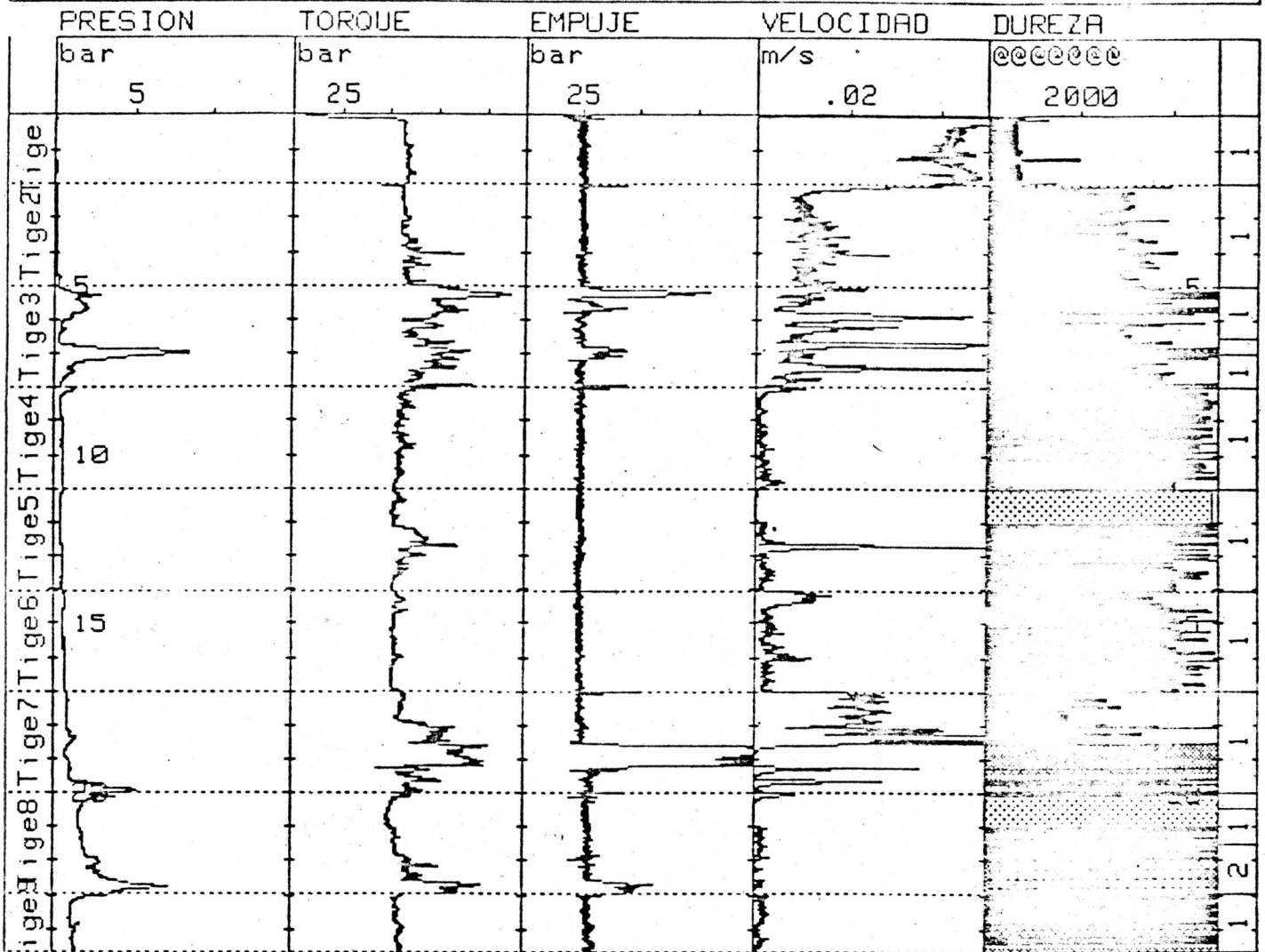


GRAFICO III - 11.

METRO DE CARACAS

Forage: RP 417

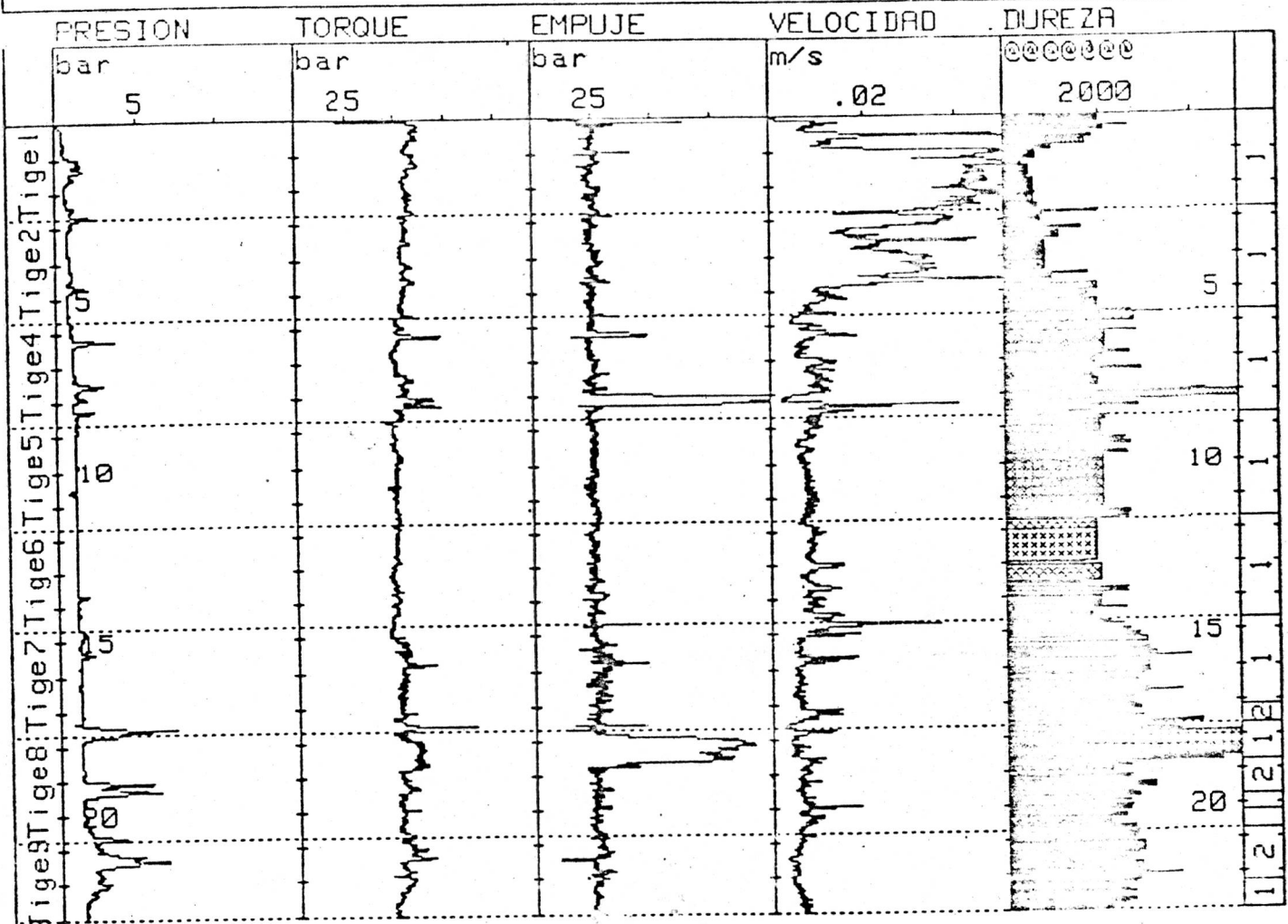


GRAFICO III - 12.

METRO DE CARACAS

Forage: RP 418

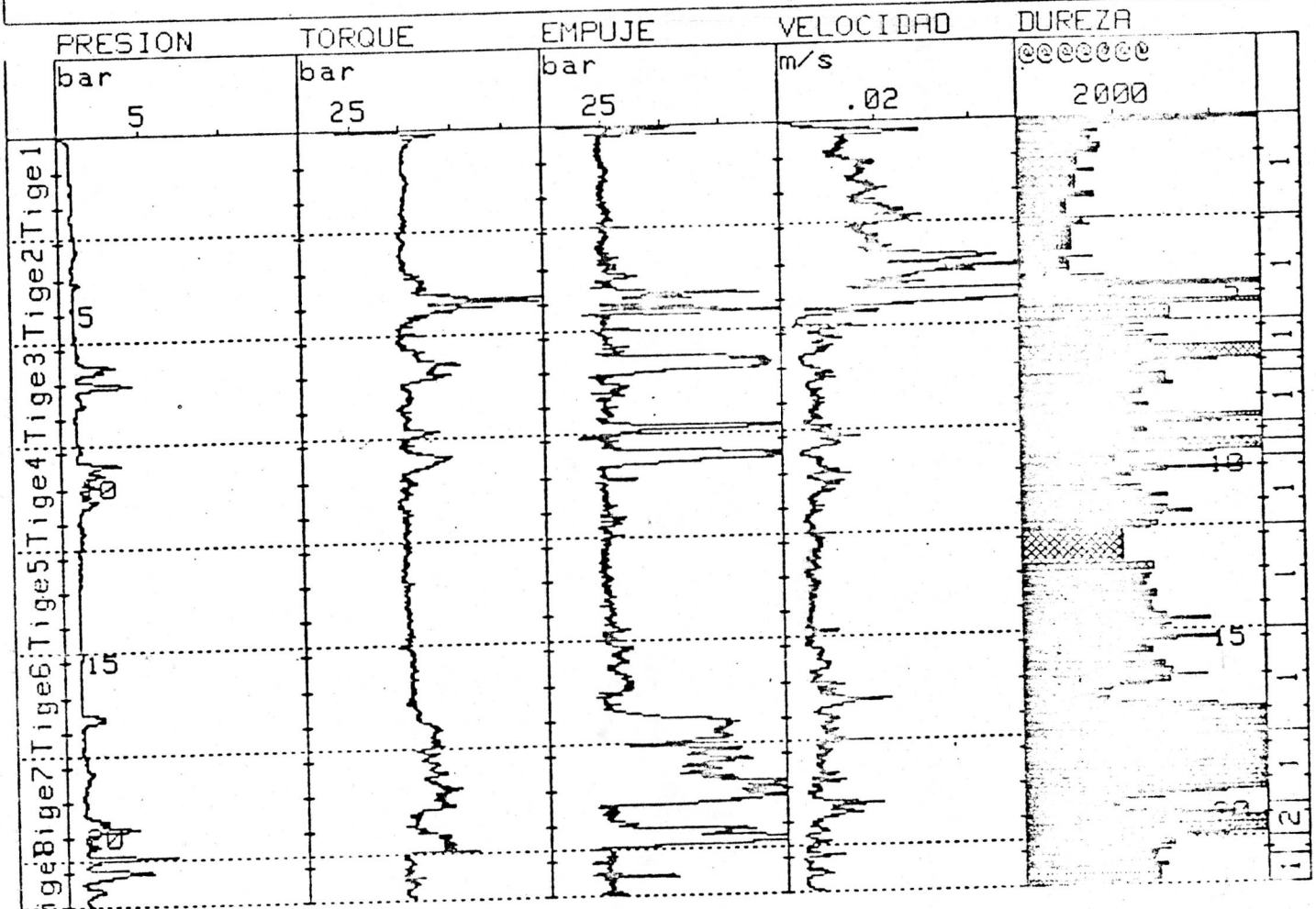


GRAFICO III - 13.

METRO DE CARACAS

Forage: RP 419

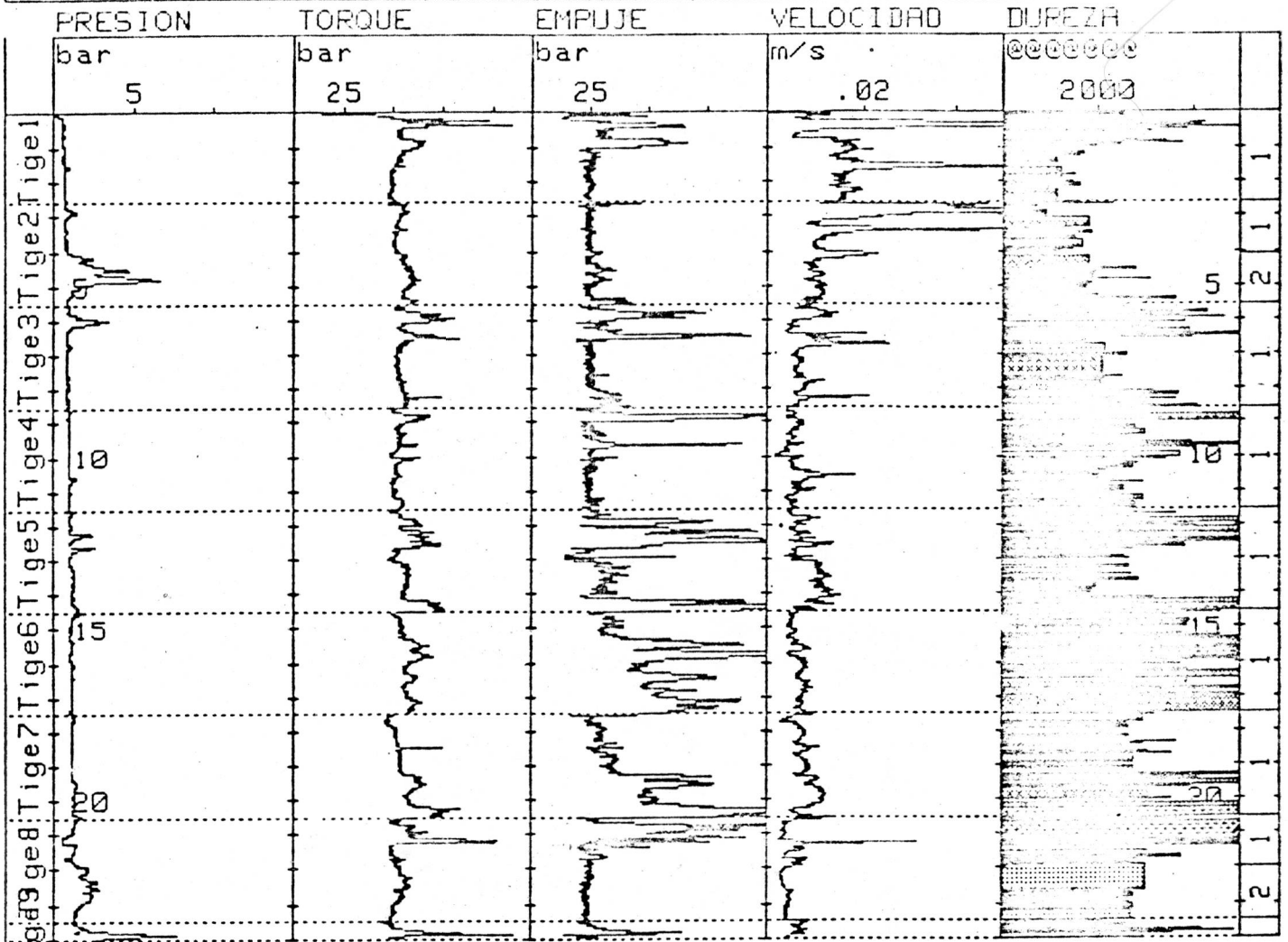


GRAFICO III - 14.

en la misma, lo que quiere decir, que hay una variación mínima en la permeabilidad. Esto queda comprobado por las pruebas de permeabilidad (Ensayo Lefranc) gráfico III-15 (Con figura III-6), el cual arroja un valor de $1,8 \times 10^{-8}$ metro por segundo menor que el máximo especificado : 1.0×10^{-6} metro por segundo.

Determinación del coeficiente de permeabilidad después de la inyección.

Basándose en los ensayos Lefranc y del gráfico del cambio de equilibrio del nivel de agua en función del tiempo, se obtiene el valor de K. (Figura III-6 y gráfico III-15).

PRUEBA DE PERMEABILIDAD TIPO LEFRANC

OBRA : METRO DE CARACAS

Perfor.: 4121 E Prueba : 2 de 16.00 hasta 17.00 m

- PRUEBA DINAMICA - NIVEL DE AGUA ASCENDIENTE -

Nº	Profundidad (m)	Tiempo (s)	H Promedio (m)	Velocidad (m/s)
1	.010	60		
2	.019	120		
3	.028	180	.019	1.5E-04
4	.038	240	.029	1.6E-04
5	.048	300	.038	1.7E-04
6	.074	480	.056	1.5E-04
7	.089	600	.069	1.4E-04
8	.109	720	.092	1.5E-04
9	.136	900	.113	1.6E-04
10	.180	1200	.145	1.5E-04

- Nivel freatico : 7.00 (m)
- Tramo cilindrico diametro.. : .038 (m)
- Coeficiente del tramo C..... : 1.58
- Diametro interior del forro : .040 (m)

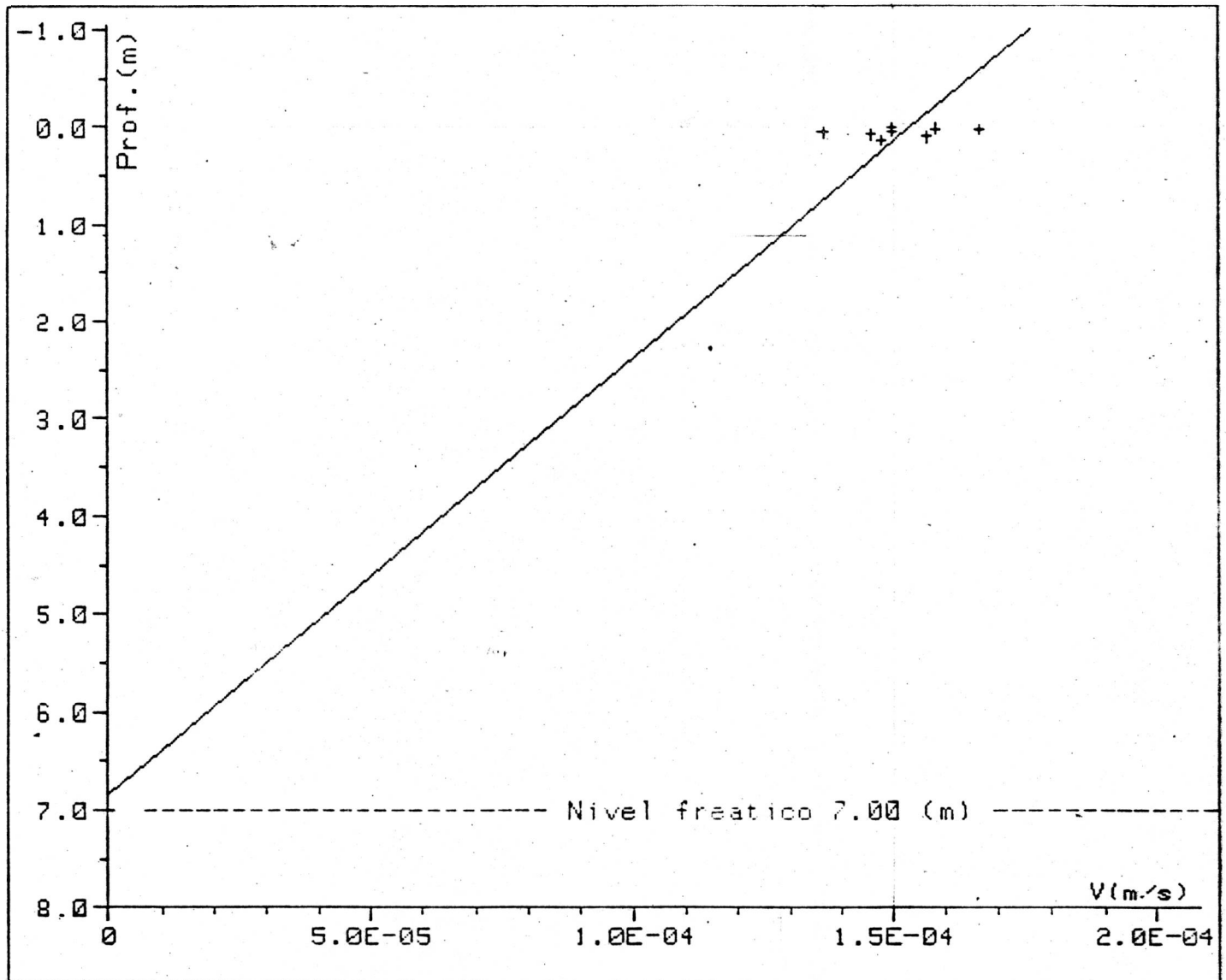
Nota : las profundidades estan relativas al nivel del suelo

FIGURA III - 6.

PRUEBA DE PERMEABILIDAD TIPO LEFRANC

OBRA : METRO DE CARACAS

Perfor.: 4121 E Prueba : 2 de 16.00 hasta 17.00 m



- $K = 1.8E-08 \text{ m/s}$ -

GRAFICO III - 15.

ABANICO 4180 (PROGRESIVA 14+826,80).

REGISTROS DE PARAMETROS ANTES DE LA INYECCION.

Observando el gráfico III-16, como el torque y el empuje se mantiene constante se puede pensar que no hay variaciones significativas en la composición del suelo. En cuanto a la velocidad, esta disminuye a partir de los 34 m, la cual puede reflejar una mejor compacidad en ese sitio.

La presión de agua indica un terreno bastante permeable, a excepción de un incremento más o menos notable entre los 30 y 31 metros que podría ser causado por la existencia de una mayor cantidad de finos.

PROCESO DE INYECCION.

Se tomaron los registros de la perforación A (gráfico III-17), cuyos volúmenes inyectados de B/C están descritos en la tabla III-6. Como puede verse - el volumen teórico es de 4080 litros y el efectivo 1200 litros, lo cual representa el 29% de la mezcla original. Esto motiva a pensar en una reinyección - que posteriormente fué decidida estudiando el comportamiento de las demás perforaciones.

En esta segunda fase de inyección, se logró colocar 1180 litros que sumado al volumen de la primera fase, representa el 58% del total (Tabla III-7).

La diferencia entre los volúmenes en ambas etapas se debe a las mismas causas descritas en el abanico 4120-K y 4120-G, sólo que no hubo comunicación entre pozos.

METRO DE CARACAS

Forage: 4180 L +@

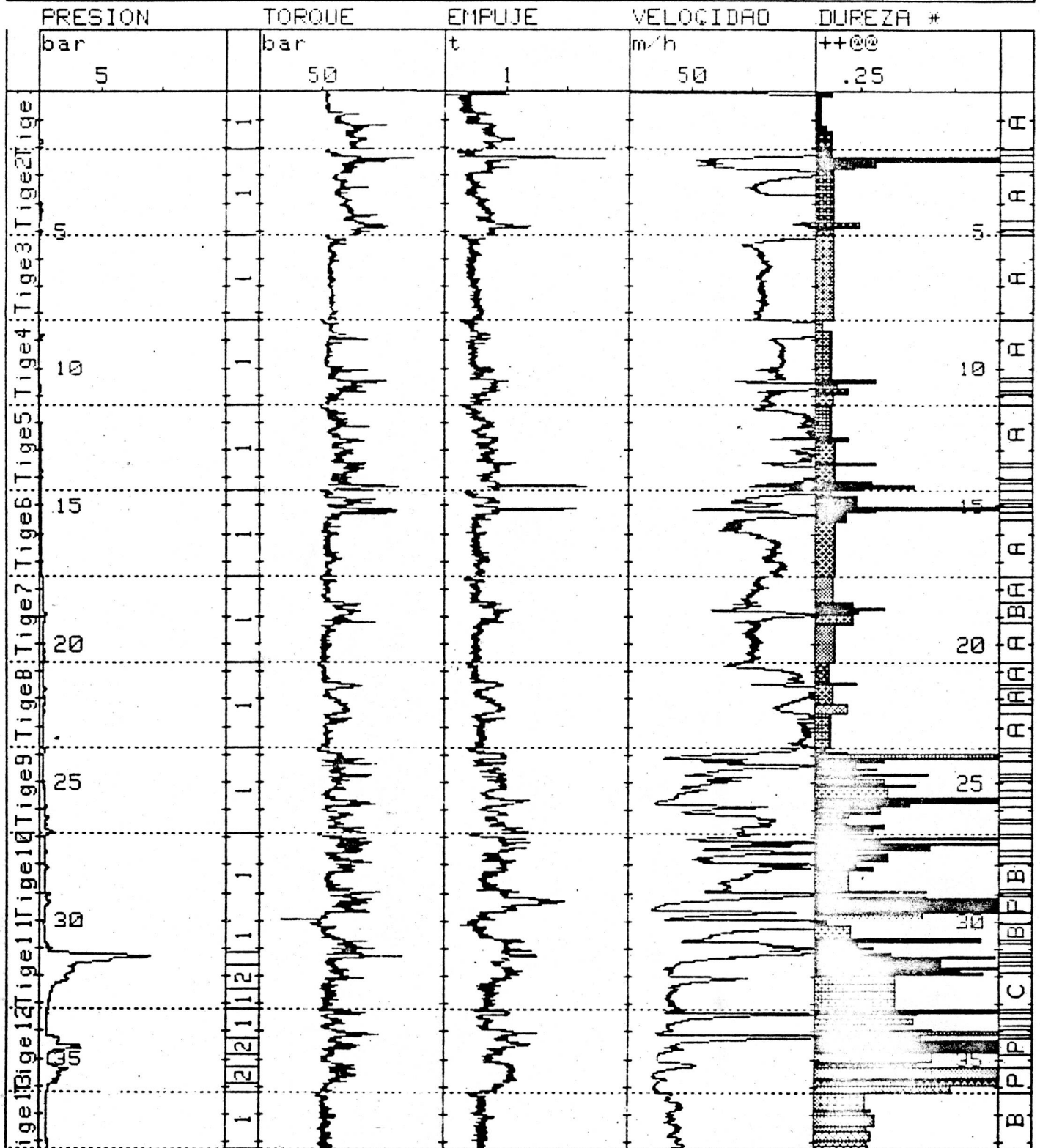


GRAFICO III - 16.

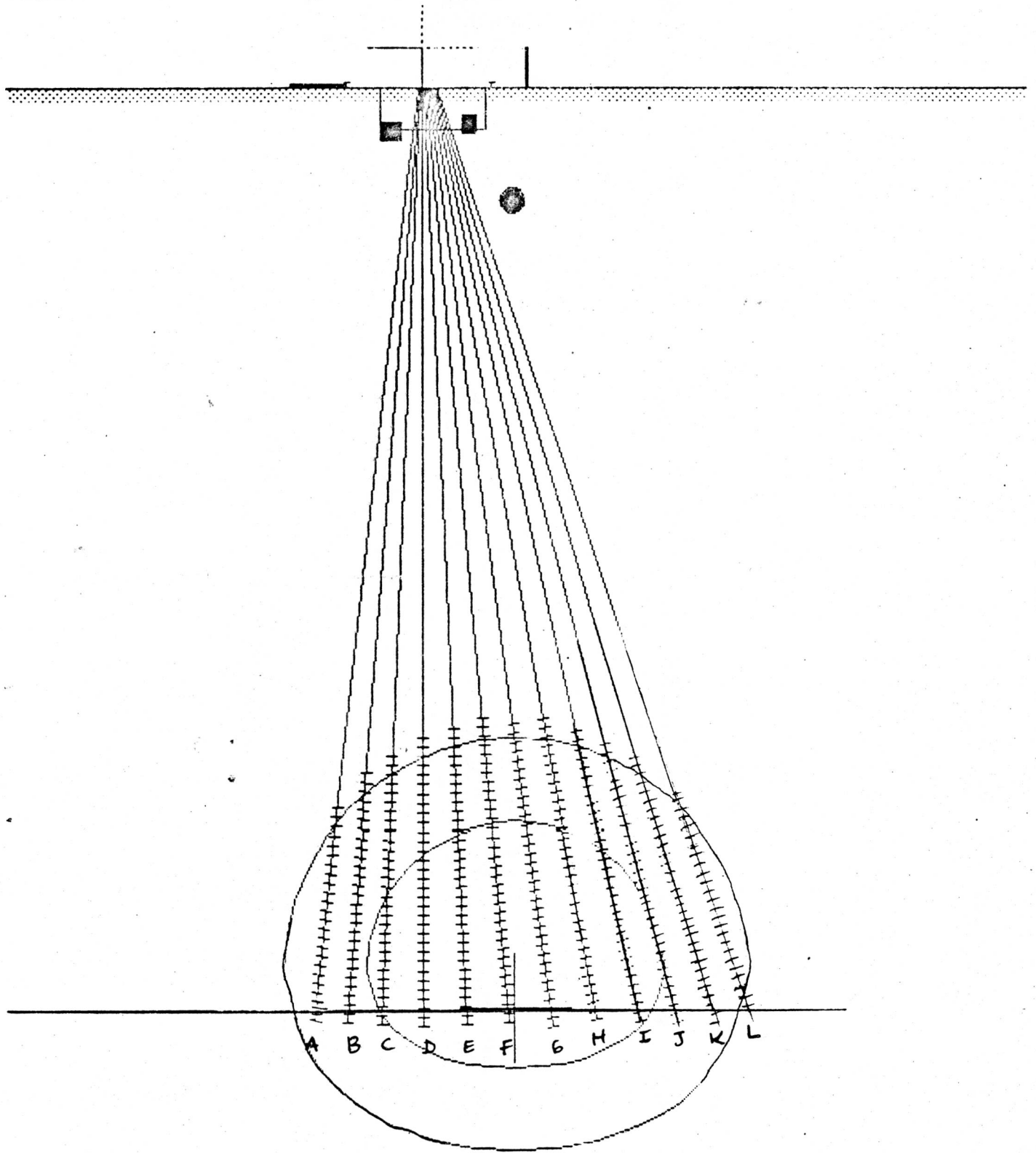


GRAFICO III - 17.


DESCRIPCION DE LAS PERFORACIONES						
	NOMBRE PERFORAC.	EJE ROT. MAQUINA	ANGULO (grados)	PROFUND. (m)	TUBO MANGUITOS	TUBO LISO
1	A	1	-6.5	34.00	7.67	26.33
2	B	1	-4.5	34.00	9.00	25.00
3	C	1	-2.5	34.00	9.67	24.33
4	D	1	0.0	34.00	10.33	23.67
5	E	1	2.5	34.00	10.67	23.33
6	F	1	5.0	34.00	11.00	23.00
7	G	1	7.5	34.33	11.00	23.33
8	H	1	10.0	34.33	11.00	23.33
9	I	1	12.5	34.67	10.67	24.00
10	J	1	14.5	35.00	10.33	24.67
11	K	1	16.5	35.33	10.00	25.33
12	L	1	18.5	35.33	8.33	27.00

TOTAL LONGITUD DE LAS PERFORACIONES (m).....: 413.00
 TOTAL LONGITUD DE TUBO DE MANGUITOS (m).....: 119.67
 TOTAL LONGITUD DE TUBO LISO (m).....: 293.33

BOMBA N° : 2
MEZCLA.....: B/C

OBTURADOR : .67 (m)

Pagina: 1

Fecha Turno y Respons.	Profund del Obturad	Cantidad (l)		Presion maxi (bars)			OBSERVACIONES
		Teorico	Efecti.	10	20	30	
30.5.80	34.00	400	20			60	ATA. Presion
Turno. de Noche.	33.33	400	20				FUGA por Boquilla
	32.67	400	0				" " "
	32.00	380	380		20		
	31.33	380	0				F. Boq.
	30.67	380	60				F. Boq.
	30.00	360	40				F. Boq.
	29.33	360	0				F. Boq.
	28.67	340	0				F. Boq.
	28.00	340	340		20		
	27.33	340	340		20		
	26.67						

G.C.H.I.

OCIMECA

NOTA: La firma de la Inspeccion sirve solamente como aprobacion inicial de las cantidades de obra
 Volumen teor. de mezcla: 4080 (l) Volumen eff. de mezcla: 1200 (l)

resaca jar 1200 — 29%
 Pliny $\frac{1180}{2380}$ — 58%

H: I: 10:15

Final

TABLA III - 6.

CONSORCIO SOLETANCHE- BACHY		Metro de Caracas Abanico 4180 Perforación : A		HOJA DE REINYECCION	
BOMBA Nº 2		OBTURADOR : .67 m			
MEZCLA ...B/C					
FECHA	Profundid. del Obturador	VOLUMEN (l)		Presión máxima (bars)	OBSERVACIONES
		teórico	efectivo		
4-6-86	34.00				
	33.33	380	40		Fuga por la boquilla
	32.67	380	20		" " " "
	32.00	400	20		" " " "
	31.33	-			
	30.67	380	380		
	30.00	320	20		Fuga por boquilla
	29.33	320	20		Fuga por boquilla
	28.67	360	360		
		340	340		

TABLA III - 7.

En cuanto a la presión, primera fase (gráfico III-18), osciló entre 17 y 24 bar, a excepción del tramo 34.00-33.33 que fué muy alta y motivó la detención de la inyección en el mismo.

En la segunda fase (gráfico III-19), las presiones oscilaron en forma muy variable, saliendose del rango establecido pero sin poner en peligro las obras civiles.

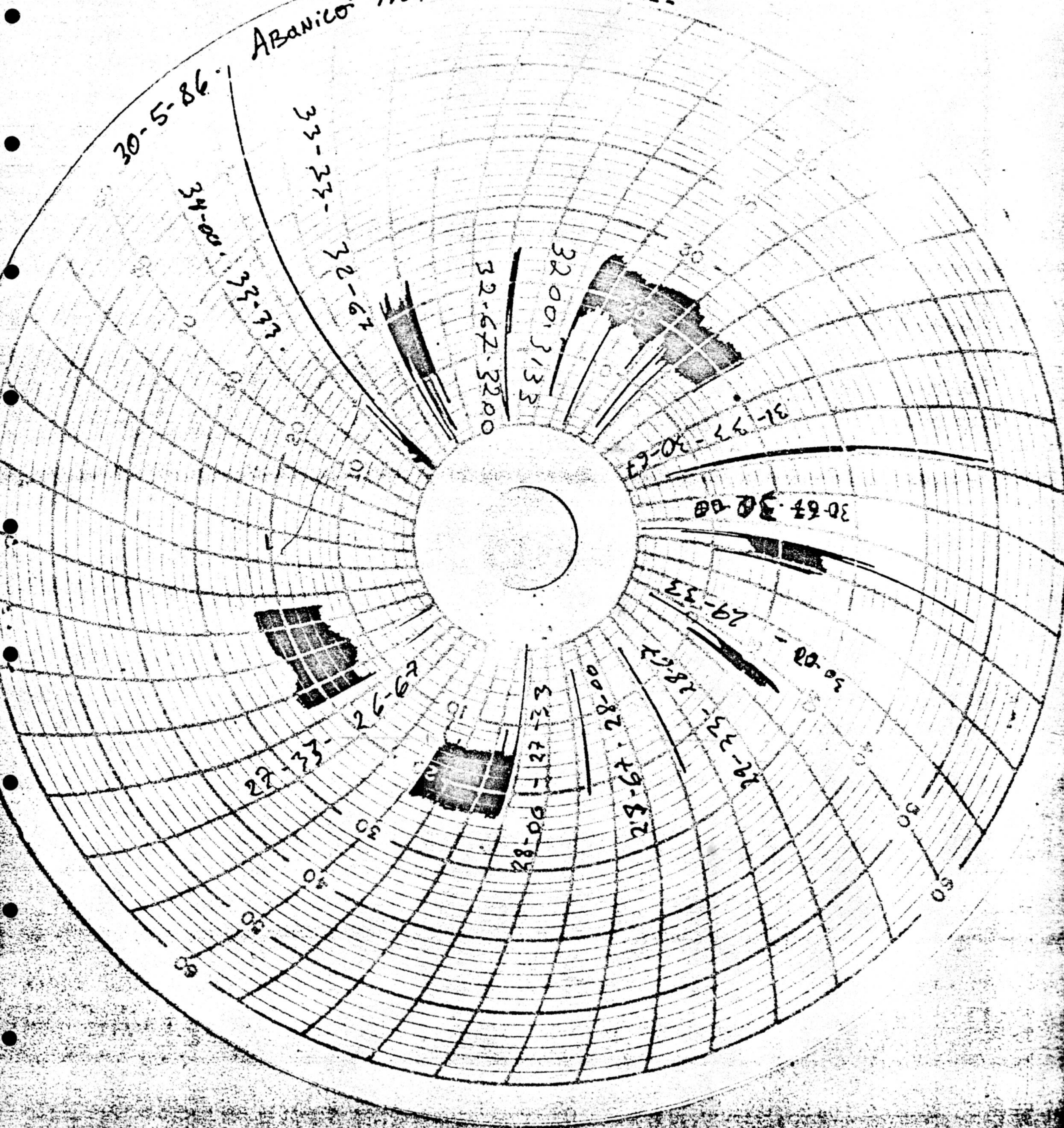
En la tabla III-8, se muestran los volúmenes inyectados de gel de silicato; como se puede apreciar, el volumen teórico no fué inyectado en su totalidad, sino en un 74%. Esta diferencia se debe a que en algunos tramos, el terreno no tuvo aceptación de lechada, a pesar de las altas presiones a que fueron sometidos (gráfico III-20). En aquellos tramos donde fué nula la inyección, se hizo una segunda fase en la cual se aumentaron los volúmenes, ya que se sospechaba la existencia de un estrato arenoso; ese nuevo valor representa el 35% del volumen del terreno.

Dicha sospecha quedó confirmada por la eficiencia de la inyección, 100% (Tabla III-9) y por las presiones utilizadas (Gráfico III-21).

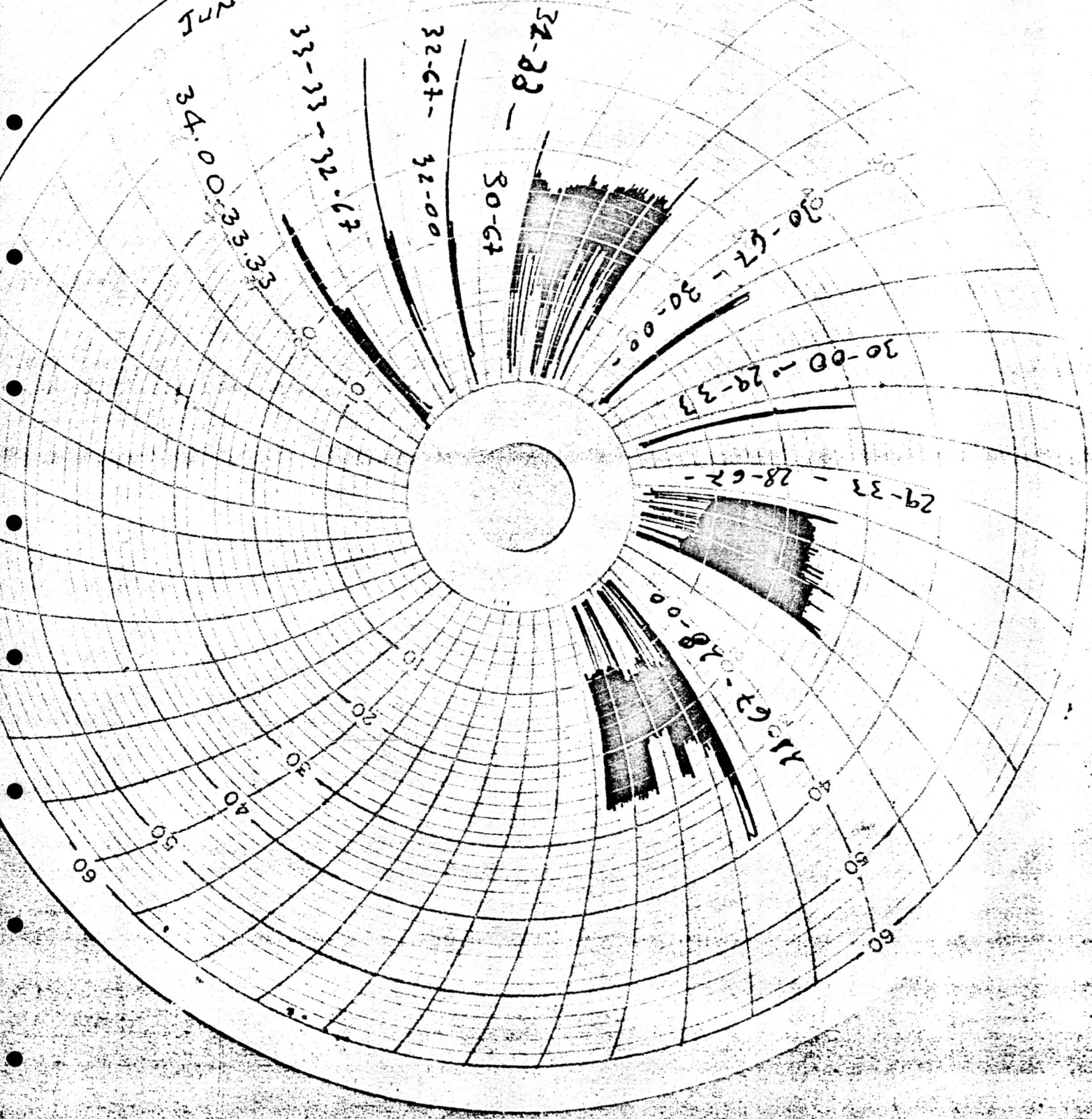
Al igual que en la perforación 4120-G, hubo la necesidad de programar una nueva inyección, para compensar el volumen requerido para un suelo arenoso, ya que se incurrió en el mismo error. En la tabla III-10, se observa que la aceptación de los volúmenes corresponde al de un suelo arenoso puesto que, se logra inyectar un 98% de la mezcla total.

En cuanto a las presiones, los gráficos III-22 Y III-23 muestran que las mismas se mantuvieron dentro del rango admisible.

ABANICO #4180-A. Bomba. 2.



JUNIO. 3/86 ABANICO 4180 A BOMBA 2



CONSORCIO
SOLETANCHE-BACHY

Metro de Caracas
Abanico 4180
PERFORACION : A

HOJA DE INYECCION

BOMBA Nº 3
MEZCLA...GEL

OBTURADOR : 0.33 m

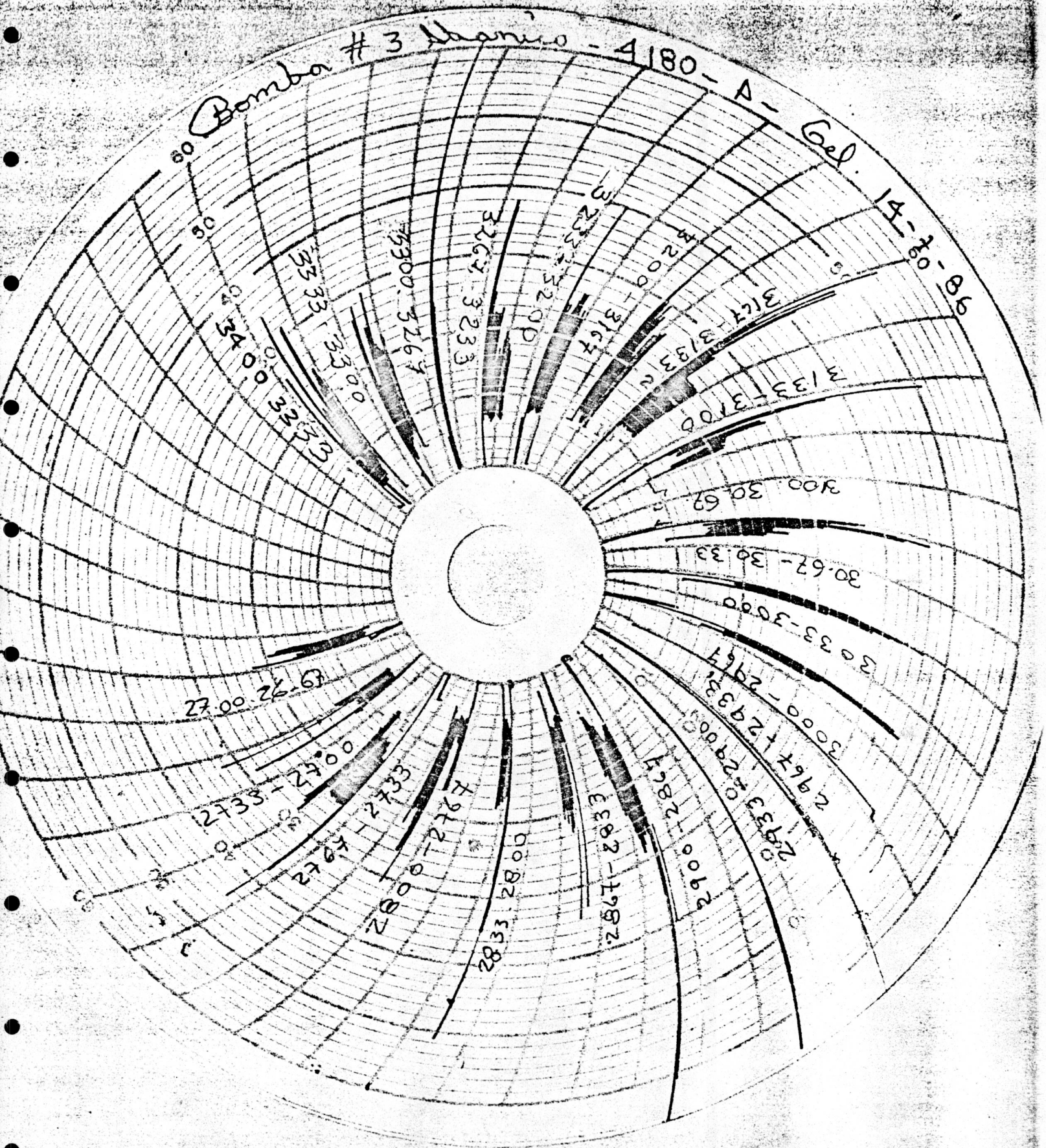
FECHA	Profundidad del Obturador	VOLUMEN (l)		Presión máxima (bars)	OBSERVACIONES
		Teórico	Efectivo		
14-7-86					
	34.00	0			
	33.67	60	60		
	33.33	60	60		
	33.00	60	0		Alta presión
	32,67	60	60		
	32,33	60	60		
	32,00	60	60		
	31,67	60	60		
	31.33	40	40		
	31.00	40	40		
	30.67	40	8		Presión alta
	30.33	40	8		" "
	30.00	40	0		" "
	29.67	40	0		" "
	29.33	40	0		" "
	29.00	40	40		
	28,67	40	40		
	28,33	40	28		Fuga por la boquilla
	28.00	40	40		
	27.67	40	40		
	27.33	40	40		
	27.00	40	40		
	26.67	40	40		

Volumen teórico de mezcla : 980 l

Vol. efectivo de mezcla : 724 l

74%

TABLA III - 8.



CONSORCIO
SOLETANCHE-BACHY

Metro de CARACAS
ABANICO : 4180 (PROG. 14+826.80)
PERFORACION : A

HOJA DE INYECCION

BOMBA N° : 2 2da FASE
MEZCLA....:GEL

OBTURADOR : .33 (m)

Pagina:1

Fecha Turno y Respons.	Profond del Obturad	Candidad (l)		Presion maxi (bars)			OBSERVACIONES
		Teorico	Efecti.	10	20	30	
28/07/86	30.67	0					
Diverso Cortesia Bencomo	30.34	160	160	850	913		
	30.00	160	160	914	936		
	29.67	160	160	938	1010		COMUNICADA CON 4177C
	29.34						

castaur@soletanche

G.C.H.I. OCIMECA

NOTA: La firma de la Inspeccion sirve solamente como aprobacion inicial de las
capitidades de obra

Volumen teor. de mezcla: 480 (l)

Volumen eff. de mezcla: 480 (l)

28-07-86

INYECCION 30.67 - 29.34

(Signature)

100%

TABLA III - 9.

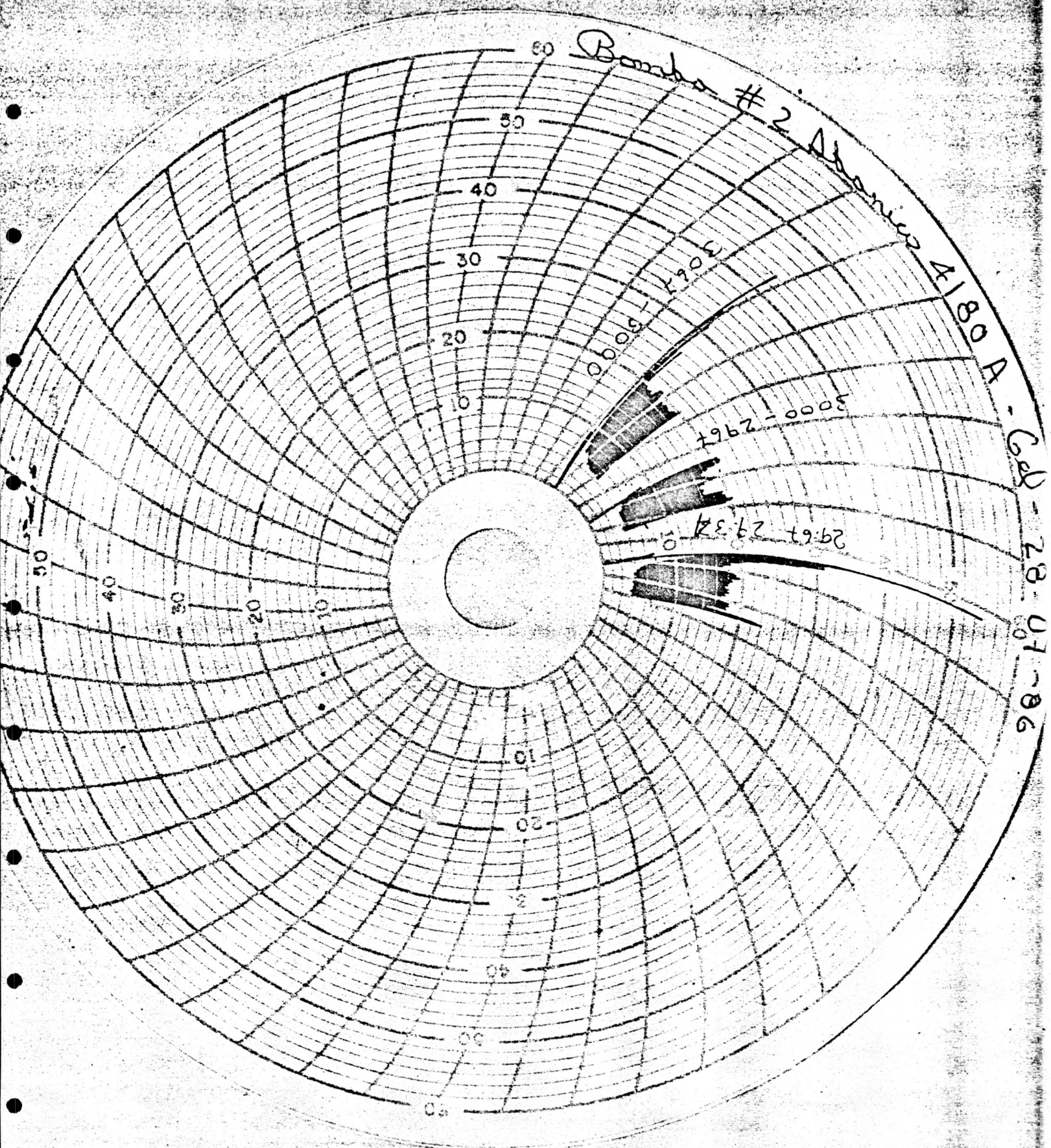


GRAFICO III - 21.

CONSORCIO
SOLETANCHE-BACHY

Metro de Caracas
Abanico 4180
PERFORACION : A

HOJA DE REINYECCION

BOMBA Nº 5.
MEZCLA... GEL

OBTURACION : 0.33 m

FECHA	profundid del Obturador	CANTIDAD (1)		Presión máxima (bars)	OBSERVACIONES
		Teórico	Efectivo		
	34.00				
		0			
	33.67				
		120	120		
	33.33				
		120	120		
	33.00				
		120	120		
	32.67				
		120	120		
	32.33				
		120	120		
	32.00				
		120	120		
	31.67				
		120	120		
	31.33				
		120	120		
	31.00				
		120	120		
	30.67				
		120	120		comunicado con 4182 A
	30.33				
		120	120		
	30.00				
		120	120		
	29.67				
		120	120		comunicado con 4178-C
	29.33				
		120	120		
	29.00				
		120	120		
	28.67				
		120	120		
	28.33				
		100	100		
	28.00				
		100	100		
	27.67				
		100	100		
	27.33				
		100	100		
	27.00				
		100	50		Presión alta.
	26.67				

Volumen teórico de mezcla : 2420 l

volumen efectivo de mezcla : 2370 l

98%

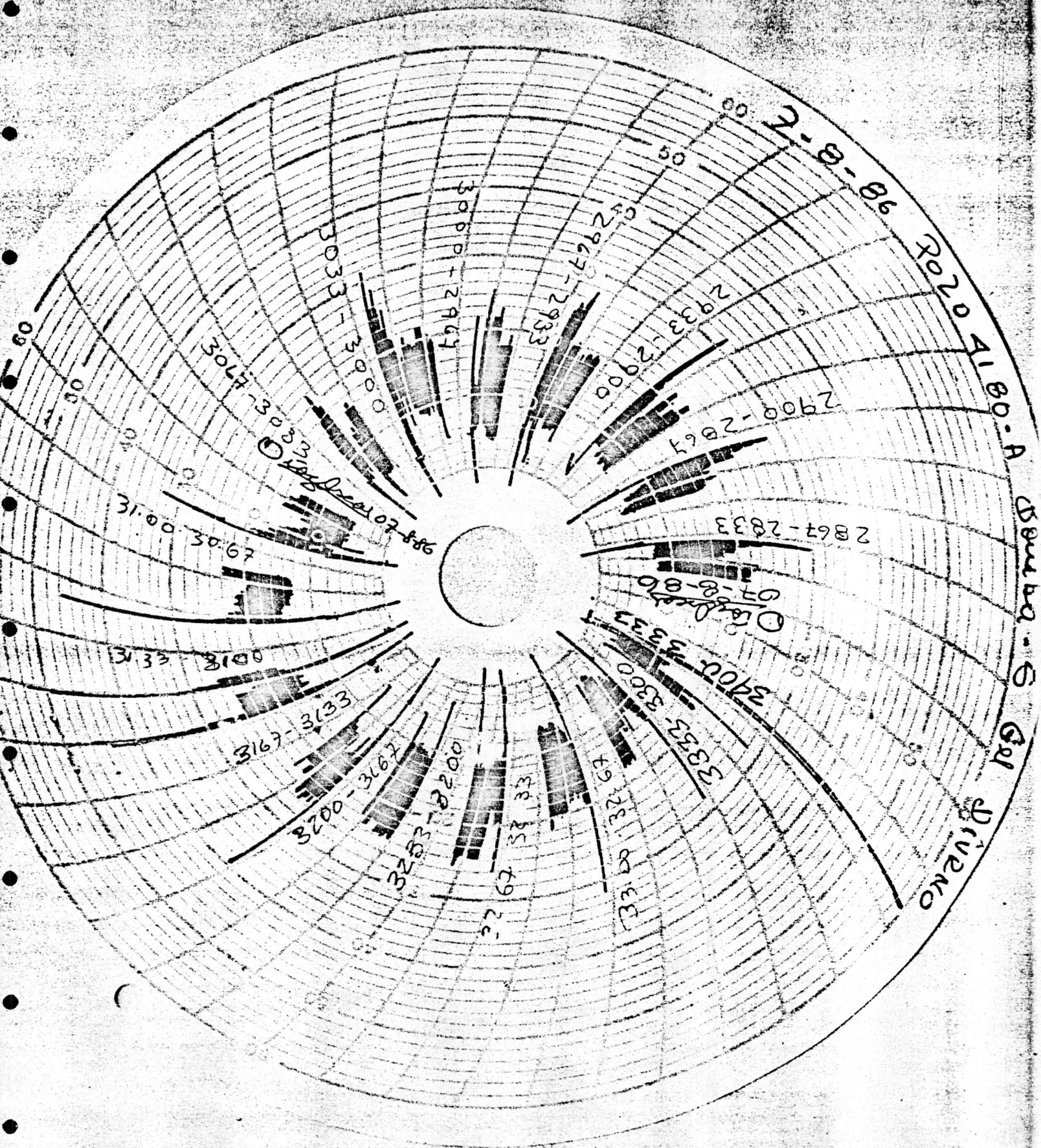


GRAFICO III - 22.

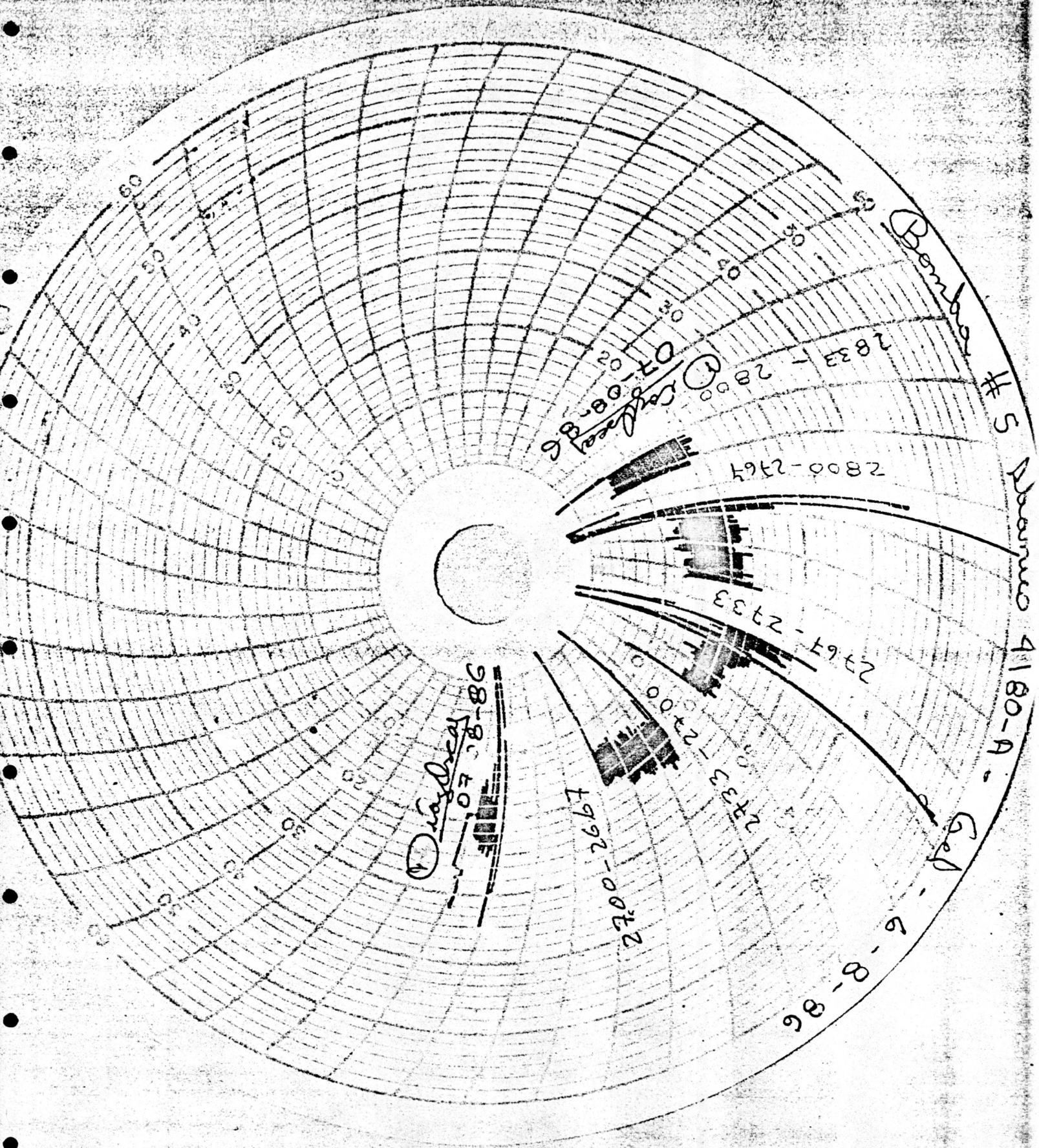


GRAFICO III - 23.

REGISTROS DE PARAMETROS DESPUES DEL TRATAMIENTO.

BENTONITA - CEMENTO:

El gráfico III-24, comparado con el gráfico III-16 (antes del tratamiento), muestra que las condiciones iniciales del terreno mejoraron considerablemente. Los parámetros de presión de agua, torque y empuje son incrementados mientras que la velocidad de avance disminuye, como era de esperarse.

GEL DE SILICATO:

En la columna de presión de agua (gráfico III-25), se puede apreciar un incremento de ésta, lo cual refleja que se logró una buena impermeabilización del terreno que es precisamente la finalidad del tratamiento.

METRO DE CARRACAS

Forage: 4181 A +++

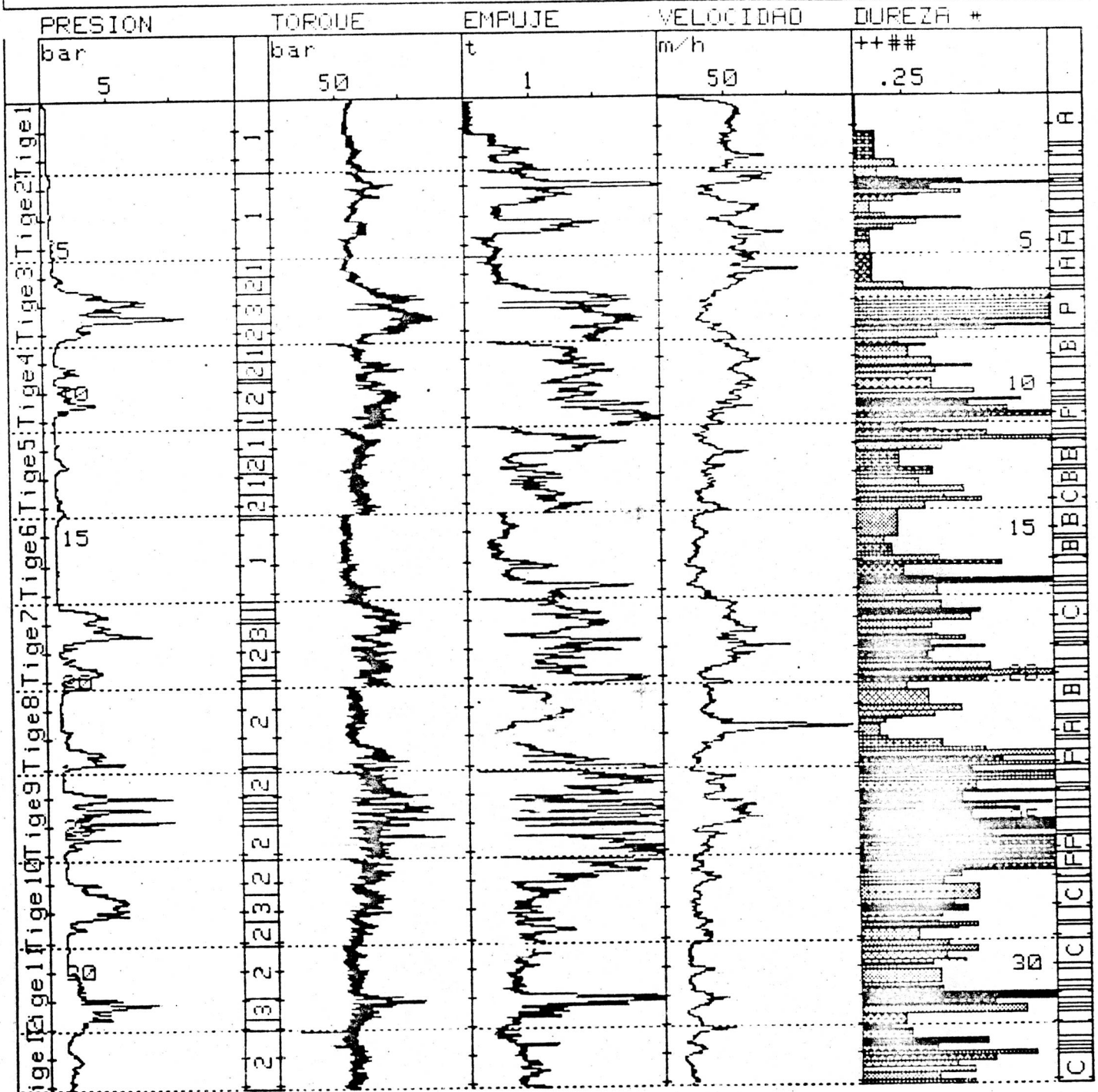


GRAFICO III - 24.

METRO DE CARACAS

Forage: RP 432

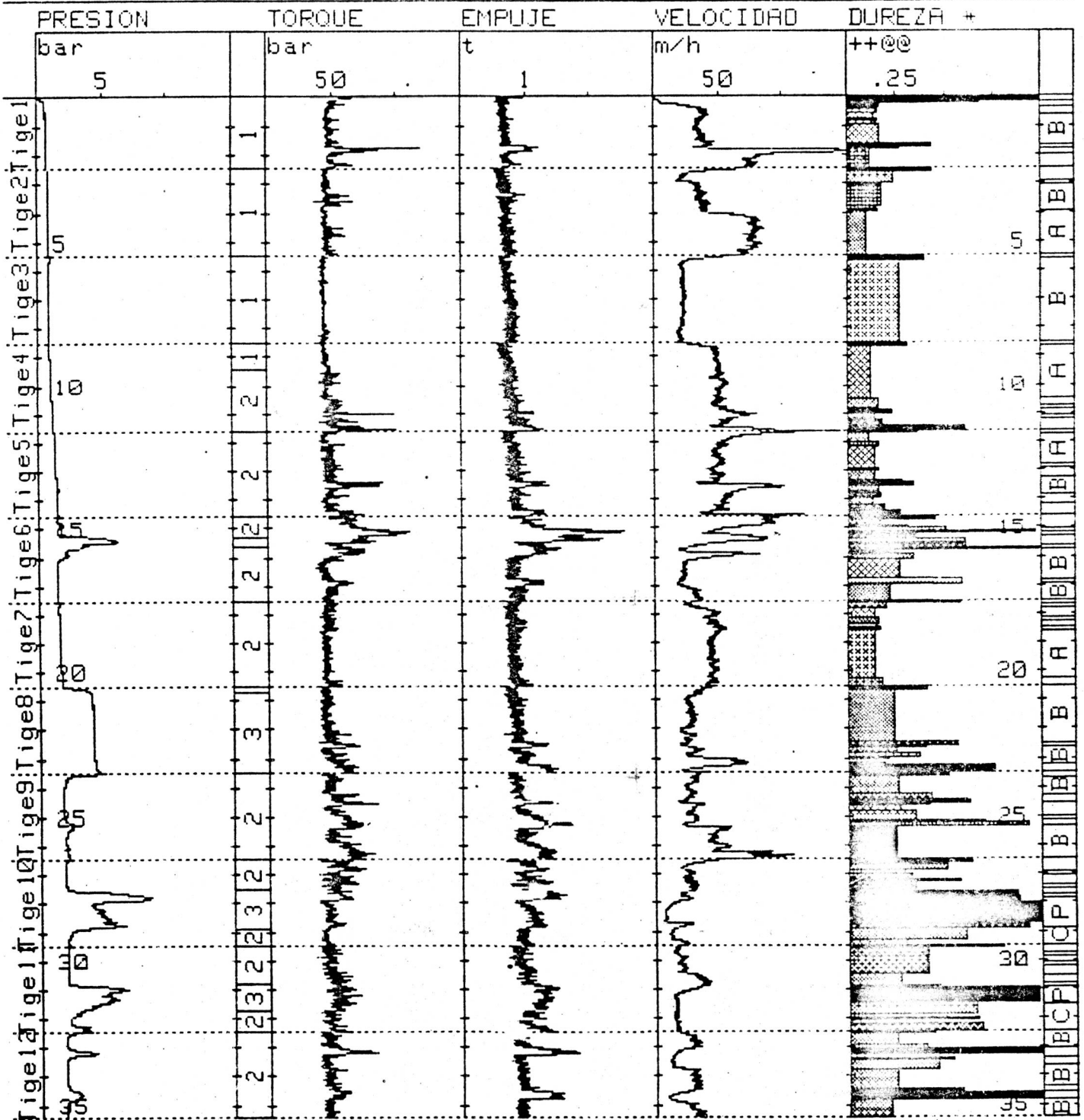


GRAFICO III - 25.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

- El trabajo operativo en la obra, se debe seguir estrictamente como fué establecido en el laboratorio, ya que los morteros tienen características - diferentes según sea el orden de mezclado y aún más, si alguno de ellos admite coloides.
- La dilución, la temperatura del mortero y la temperatura del medio inyectado, influyen directamente en el fraguado; no ocurriendo lo mismo con la presión y el proceso de agitación.
- La medida de la viscosidad no es una buena referencia para determinar el fraguado ya que es muy impreciso, debido a que el aumento de la viscosidad no implica fraguado. Por el contrario, la medida de la rigidez detecta un aumento de la misma en el momento del fraguado, pero éste no se puede determinar de una forma exacta por la aparición progresiva de este aumento.
- La viscosidad de un mortero aumenta con el tiempo.
- En los morteros de suspensiones inestables, es condición necesaria pero no suficiente, que los granos de cemento sean menores que la menor dimensión de los espacios vacíos de la arena, para que la inyección sea posible. Además la velocidad de la corriente debe estar por encima de la velocidad a la cual el cemento pueda depositarse.
- Sí lo que se desea es una resistencia apreciable es necesario que la relación $a/c \geq 2.0$
- Sí se desea una simple consolidación y una limitación del radio de acción de la inyección, por tixotropía es necesario una relación $a/c \geq 5.0$
- Sí se desea que no tenga carácter tixotrópico, se puede disminuir más la relación a/c .

- La adición de pequeñas cantidades de bentonita al cemento, permite realizar morteros inyectables que presentan una buena resistencia mecánica.

- La adición de bentonita, en un mortero B/C, aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte, siempre y cuando la relación a/c sea constante.

- El comportamiento de la bentonita es totalmente diferente según se utiliza inmediatamente después de diluída o se espere varios días. En este último caso, las partículas tienen tiempo suficiente para saturarse de agua.

- Con el aumento de la cantidad de bentonita, se reduce mucho el tiempo de fraguado, esto es bastante favorable, ya que se puede jugar con las proporciones de los diferentes constitutivos para regular el tiempo de fraguado del gel-cemento-bentonita-agua.

- Los morteros de arcilla tratada, pueden ser usados con excelentes resultados, en la realización de pantallas impermeabilizantes capaces de resistir cargas apreciables de agua; no ocurriendo lo mismo en consolidación, ya que no tiene ninguna resistencia mecánica.

- Es conveniente en los morteros que contengan arcilla y arena, añadir las al mismo tiempo para evitar la formación de grumos y reducir el tiempo de agitación, para obtener así un mortero homogéneo.

- La mezcla de arcillas de naturaleza diferente y la posible adición de productos químicos, puede dar al mortero una viscosidad distinta a la esperada, debido a que se está mezclando productos coloidales.

- La mayoría de las inyecciones químicas son destinadas a impermeabilizar más que para incrementar la resistencia mecánica.

- Los inconvenientes que presentan los geles de silicato de sodio son:

a) Cuando se utiliza silicato puro o poco diluído, la composición de este tiene una importancia considerable, ya que son muy sensibles a los errores de dosificación.

b) El frío actúa sobre los silicatos antes de la elaboración de los morteros, influenciando la transformación del gel.

c) Dependiendo de la composición del silicato y la naturaleza del reactivo estos geles presentan sinéresis.

d) Son solubles en agua, sin embargo, soportan los intensos lavados a que son sometidos en las pruebas de laboratorio, debido a que la sinéresis impide la dilución, obteniendo resultados enteramente satisfactorios.

- El alto costo de los productos químicos, comparado con la arcilla y el cemento, requieren una ingeniería diferente aproximando su uso en el campo como materiales de inyección. El resultado es el desarrollo de técnicas designadas a obtener máximos beneficios de un volumen limitado de lechada. Esto solo puede ser completo si la colocación física de la misma en la formación es conocida con razonable certeza.

- El flujo de agua subterránea provoca dilución y desalojo de la lechada, por eso se recomienda su estudio cuando se planifique un programa de inyección. En presencia de este flujo, es conveniente la utilización de geles con tiempos muy cortos de gelación, para evitar el desalojamiento y dilución de la lechada y lograr uniformidad de penetración.

- Los morteros de fraguado relativamente rápidos, reducen las fugas durante la inyección.

- El uso de acelerador de fraguado o el mezclar cemento aluminoso con cemento siderúrgico, presenta el inconveniente de obturación de los conductos de inyección, por endurecimiento rápido del mortero.

- Una manera de lograr un fraguado rápido, es utilizando un producto inerte que aumente la viscosidad del mortero; tal es el caso del aserrín, el cual, absorbe cierta cantidad de agua haciendo que el mortero se haga pastoso.

-La presión alta, aumenta la adherencia de los sedimentos a los terrenos; contribuye a evitar el fraguado de un magma más o menos enlodado; facilita la expulsión del agua sobrante, quedando solamente el agua de cristalización constituyendo un corrector de los posibles errores de dosificación; crean en el terreno, siguiendo más o menos los planos de sus diaclasas, nuevas fracturas revestidas de una fina película impermeable, haciendo que la circulación de agua esté limitada por fuertes pérdidas de carga.

-Hay que tener especial cuidado con las presiones muy altas debido a que pueden producir deformaciones excesivas del terreno que conducen a un incremento en el número y tamaño de las grietas.

- Las fisuras inclinadas o verticales colocadas entre fisuras horizontales, actúan como el medio de circulación desde la zona de fuertes presiones hacia la zona de bajas presiones.

- A pesar de que no se logró inyectar en su totalidad los volúmenes previstos, las condiciones iniciales del terreno mejoraron considerablemente, según se desprende del ensayo de permeabilidad y de las perforaciones de control realizadas después de la inyección, logrando con esto, una disminución de los riesgos de derrumbes durante la excavación del túnel.

- Cabe destacar que se pueden producir pequeñas filtraciones en el proceso de excavación, sobre todo en aquellos sitios donde el nivel freático se encuentra muy por encima de la profundidad de la excavación; sin embargo, un aumento considerable de las filtraciones puede ser originado por la inyección de un volumen deficiente, debido a una interpretación no acertada de los registros

de parámetros, la cual hace que se defina incorrectamente el tipo de suelo.

En estos casos se recomienda programar una nueva inyección que compense la deficiencia de volumen que corresponda al tipo de suelo.

- Con el uso del novedoso sistema de registros de parámetros, a través del ENPASOL, se pudo agilizar los trabajos de reconocimiento del suelo, a todo lo largo del tramo, logrando determinar a grosso modo las características mecánicas del terreno antes y después del tratamiento.

- Es importante el estudio concienzudo del terreno porque influye notablemente en la eficacia y eficiencia de la inyección, evitándose la determinación errónea de los volúmenes a inyectar.

- Utilizando como valor máximo de volumen de gel, el 35% del volumen del terreno, se logra una buena impregnación del mismo cuando se trata de arenas y limos arenosos. En las zonas areno-arcillosas, este porcentaje se reduce a un 10% y en las zonas predominantemente arcillosas no se inyecta el gel.

- Cuando los terrenos son arcillosos o limosos, y que no se puedan impregnar, se utiliza una lechada de B/C, la cual produce una compresión y por ende una consolidación de los mismos.

- Tratándose de terreno aluvional, generalmente se recomienda inyectar un volumen de mezcla de B/C correspondiente a un 10% del volumen del terreno.

- Cuando el consumo de lechada es nulo en un determinado tramo de la perforación, se manifiesta por fugas por la boquilla, las cuales se deben a varias razones:

- a.- Presencia de peñones alrededor del manguito.
- b.- Ensanchamiento del pozo cerca del manguito, donde se produce una capa muy gruesa del mortero de fijación del tubo de manguito.
- c.- Dosificación indebida del mortero de fijación; que lo puede hacer muy rígido o muy elástico dependiendo del exceso de cemento o bentonita respectivamente.

d.- Presencia de un núcleo de arcilla muy consolidada.

Cuando sucede esto se podría optar por inyectar un volumen mayor al previsto en el tramo siguiente.

- La comunicación de pozos puede ser debida a fisuras existentes o provocadas por presiones excesivas, por lo tanto es necesario detener la inyección y pasar al tramo inmediato, permitiendo así que el fraguado de la lechada tapone el conducto de fuga.

- En cuanto a la efectividad de las inyecciones, no existe un patrón de referencia al cual pueda recurrirse para establecer comparaciones e indicar si fueron necesarias o no para facilitar la excavación del túnel. Lo que si se puede afirmar es que el tratamiento, casi en su totalidad, logró mejorar las características mecánicas del suelo, lo cual queda demostrado al comparar los registros de parámetros antes y después de las inyecciones, desde este punto de vista si se pueden considerar exitosas las inyecciones.

- El proceso de inyección se desarrolló satisfactoriamente y con gran facilidad, presentándose pequeños problemas que son normales en estos trabajos: - Fuga de la lechada por la boquilla, comunicación de pozos, pérdidas de tuberías, presiones altas.

- La dosificación del mortero y del gel, resultó la más apropiada en la mayoría de las zonas tratadas; hay que tener presente que debe existir una relación muy estrecha entre los volúmenes de gel y los volúmenes de B/C para que el tratamiento logre su cometido. La deficiencia de uno de ellos pone en juego la efectividad de la inyección.

- Estudiando toda la información acerca de los volúmenes inyectados, la cual por ser muy extensa no se colocó en este Trabajo Especial de Grado, puede observarse que se lograron inyectar volúmenes de mezcla que estan muy cerca de los volúmenes teóricos, lo cual refleja también la efectividad de las -

inyecciones. Esto confirma, además, lo que la experiencia sugiere: Para suelos aluvionales, el volumen de B/C a inyectar corresponde al 10% del volumen del terreno y para el gel de silicato, dependiendo del tipo de estrato, 10% a 35% del volumen del terreno, haciendo una vez más recomendable inyectar estos porcentajes de volumen para este tipo de suelo.

- Las causas que originan zonas de derrumbes durante la excavación del túnel en terrenos ya inyectados son varias, las más resaltantes son: Interpretación errada de los registros de parámetros que conduce a inyección de volúmenes de mezclas deficientes. En este caso se recomienda un nuevo estudio del terreno y programar una reinyección que compense el volumen teórico real. La otra causa importante es debida a problemas operacionales, esto es, avance muy rápido de la excavación respecto a la construcción del túnel, aquí es recomendable que los trabajos de excavación vayan acorde a los trabajos de construcción, de modo tal que permita avanzar la obra con más seguridad y eficacia.

BIBLIOGRAFIA.

H. CAMBEFORT: INYECCION DE SUELOS.

- (1) R. GLOSSOP: The invention and development of injection processes.
- (2) A. LIZARRALDE: Transferencia Tecnológica en el Metro de Caracas.
- (3) Revista Metro de Caracas. Octubre, 1977.
- (4) M. PAPADAKIS: L'injectabilité des coulis et mortiers de ciment. Revue des Matériaux de Construction. Diciembre, 1959.
- (5) J. FLORENTIN y G. L'HERITEAU: Le coulis de ciment thermocolloidal et ses possibilités d'application aux injections, aux travaux routiers, etc.
- (6) C. CARON: Procédé d'injection des terrains perméables par formation d'une résine phénoplaste.
The development of grouts for the injection of Fine Sands.
Conferencia sobre Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths. Londres, 1963.
- (7) STEFAN: Contribution a l'étude de cheminement d'un coulis d'injection dans un milieu poreux perméable. Tesis de Ingeniero Doctor.
- (8) W.J. BAKER: Flow in fissured formations. IV Congreso Mundial del Petróleo.
- (9) M. LUGEON: Barrage et géologie. Dunod. París.
- (10) JOURNAL OF THE SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS DIVISION. Enero, 1968.
- (11) J. MANDEL: Equilibre limites plans des milieux plastiques. Travaux.
- (12) C. CARON: Etude physico-chimique des gels de silice. (Tesis Doctoral)

