

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA  
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA



ESTUDIO DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION DE LA  
PRESA YURACMAYO EN LABORES SUBTERRANEAS  
(MARGEN DERECHA DEL TRAMO A<sub>350</sub> - A<sub>405</sub>)

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO GEOLOGO

JORGE ALBERTO RAMIREZ SEMINARIO

LIMA - PERU

1994

A MI ALMA MATER POR  
DARME LO QUE TENGO  
Y A LA GEOLOGIA POR  
ENSEÑARME SUS SECRETOS

A MIS PADRES LAURO Y ESTHER POR  
SU APOYO INCONDICIONAL Y  
CONFIANZA EN MI Y A MIS HERMANOS

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al consorcio Energoprosent Guinconsa que me brindo la oportunidad de realizar mi Tesis en el Proyecto Yuracmayo, ya que durante mi estadia en Obra me dieron todas las facilidades del caso.

También quiero agradecer a todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la elaboración del presente estudio, especialmente a mis Asesores Ingenieros Carlos Vallejo Cortez y Jose Martinez Talledo, así como a todos mis amigos.

Un agradecimiento especial a mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Ingeniería, en especial a la Escuela de Ingeniería Geológica por acogerme en sus Aulas durante mi permanencia en la Universidad y por enseñarme las Ciencias Geologicas.

## RESUMEN

El presente informe consta principalmente de tres partes. En la primera que corresponde al capítulo uno se hace un resumen general de la presa (geología, tipo de presa, canteras, etc), la segunda parte contiene la base teórica de las inyecciones en rocas fisuradas así como las diferentes técnicas y metodologías de inyección aplicadas en la obra. Finalmente la tercera parte es el estudio en si de la pantalla de impermeabilización que corresponde a los capítulos tercero y cuarto.

La pantalla de impermeabilización en una presa es parte primordial y su construcción demanda especial interes. Ella se lleva aproximadamente el 40 a 50% del trabajo global de la obra, es debido a ello que el presente informe tiene por finalidad primordial el contribuir a su construcción. Para lograr ello se ha realizado un estudio geológico-geotécnico del macizo rocoso de la margen derecha (tramo A-350 al A-404) cuyos datos y análisis se aprecian en los capítulos cuatro y cinco respectivamente, como se menciona anteriormente. Las condiciones y recomendaciones se dan el capítulo cinco.

*ESTUDIO DE LAS INYECCIONES DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION  
DE LA PRESA YURACMAYO EN LABORES SUBTERRANEAS  
(MARGEN DERECHA DEL TRAMO A<sub>350</sub> - A<sub>404</sub>)*

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

INDICE

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Ubicación y Acceso	2
1.2.1. Ubicación	2
1.2.2. Acceso	2
1.3. Aspectos Geológicos	2
1.3.1. Geomorfología	4
1.3.2. Afloramientos rocosos	9
1.3.3. Suelos	12
1.3.4. Condiciones estructurales	13
1.4. Geología Local	15
1.4.1. Geología del sitio de presa	15
a. Características geológicas y geotécnicas de las unidades	15
b. Estabilidad de laderas	25
c. Aguas subterráneas	26
1.4.2. Geología del embalse de presa	28
a. Características geológicas	28
b. Estabilidad de laderas	29
c. Permeabilidad de la roca	32
1.4.3. Estudio de canteras	32
1.5. Memoria descriptiva del Proyecto	37
1.5.1. Tipo de presa	37
1.5.2. Características de la pantalla de impermeabilización	39
2. PARAMETROS, ESTUDIOS Y CONCEPTOS PARA LA APLICACION Y DISEÑO DE UNA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION	47
2.1. Consideraciones generales de inyección	47
2.1.1. Investigaciones preliminares	48
a. Investigaciones geognósticas	48
a.1. Ensayos de permeabilidad	48

a.2. Estudio de los testigos de perforación	61
b. Ensayos de laboratorio	63
2.1.2. Características y tipos de mezclas	73
a. Mezclas estables	77
2.1.3. Mecanismos de penetración de lechadas.	87
a. Circulación en medios granulares (suelos)	87
b. Circulación en medios fisurados (rocas)	93
c. Inyección de mezclas estables	98
2.1.4. Presiones de inyección	101
2.1.5. Caudal de inyección	106
2.1.6. Método P*V ó GIN	107
2.1.7. Límite de inyectabilidad	115
2.2. Aplicaciones de las inyecciones	118
2.2.1. Medios inyectables	118
2.2.2. Tipos de inyecciones	125
a. Inyecciones de impermeabilización	125
b. Inyecciones de consolidación	126
c. Inyecciones de contacto	126
d. Inyecciones de relleno	127
2.2.3. Técnicas en inyecciones de impermeabilización	134
a. Equipo de inyección	136
b. Diseño y metodología de construcción de una pantalla de inyección	143
2.2.4. Control de inyecciones	148
3. INYECCIONES DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION DE LA PRESA YURACMAYO EN LABORES SUBTERRANEAS (TRAMO A <sub>350</sub> - A <sub>405</sub> )	157
3.1. Condiciones Geológicas y Geotécnicas del macizo rocoso	157
3.1.1. Geología del tramo de estudio	159
a. Geomorfología	159
b. Litología	159
c. Geología Estructural	160
3.1.2. Características geomecánicas de la roca	161
a. En superficie	161
b. En labores subterráneas	162
3.1.3. Tipo de excavación y soporte del túnel	164

3.2. Investigaciones definitivas realizadas en la zona de estudio	165
3.2.1. Metodología de toma de datos	165
a. Datos obtenidos de las perforaciones exploratorias	165
b. Datos obtenidos de las inyecciones de impermeabilización	166
3.2.2. Investigaciones con perforaciones diamantinas	166
a. Litología.	166
b. Ensayos de permeabilidad	166
c. Valores del RQD	167
d. Valores de las características geomecánicas del macizo	178
3.3. Diseño de las Inyecciones de Impermeabilización	184
3.3.1. Introducción	184
3.3.2. Categorías de los agujeros de inyección	184
3.3.3. Ubicación y descripción de la malla de los agujeros de inyección	185
3.3.4. Especificaciones técnicas	187
a. Tipos de mezclas	187
b. Presiones y volúmenes de inyección.	192
c. Costo de mezcla por tonelada de cemento inyectado	198
3.3.5. Procedimientos aplicados	199
3.3.6. Volúmenes de inyección según categorías de los agujeros inyectados	200
4. ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS INVESTIGACIONES GEOGNOSTICAS E INYECCIONES EFECTUADAS	211
4.1. Isocurvas de permeabilidad	211
4.2. Isocurvas de volúmenes de inyección	212
4.3. Isocurvas de valores de RQD	216
4.4. Isocurvas de valores de las características geomecánicas	216
4.5. Diseño definitivo de las inyecciones en la Pantalla de Impermeabilización	218
4.6. Areas de inyección	222
4.6.1. Areas críticas de inyección	222
4.6.2. Areas medias de inyección	224

4.6.3. Areas de minima inyección	224
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	225
5.1. Conclusiones	225
5.2. Recomendaciones	229
6. REFERENCIAS	232
<b>FIGURAS</b>	
1.1. Plano de Ubicación	3
1.2. Disposición de las obras subterráneas de la Presa Yuracmayo	40
1.3. Sección transversal de la Presa	41
1.4. Sección longitudinal del eje de presa	42
1.5. Ubicación de los taladros de inyección de la pantalla de impermeabilización de la presa Yuracmayo	46
2.1. Ensayos Lefranc	51
2.2. Ensayos Lefranc	51
2.3. Ensayo Lugeon	56
2.4. Prueba de factor de sedimentación	71
2.5. Ensayo de permeabilidad (Laboratorio)	71
2.6. Gráfico de Inyectabilidad a alta velocidad	74
2.7. Relación experimental entre fluidez y cociente cemento/bentonita	74
2.8. Gráfico de diseño de mezclas de c/a en peso	75
2.9. Comportamiento reologico de los fluidos Binghamianos (suspensiones) y newtonianos (soluciones)	78
2.10. Evolución de las características reologicas de mezclas binghamianas	78
2.11. Gradiente mínima para iniciar la inyección de mezclas binghamianas	80
2.12a. Distribución de velocidades	91
2.12b. Esgurrimiento de un tubo cilíndrico	91
2.13. Mecanismos de rompimiento	91
2.14. Proceso de fracturamiento	94
2.15. Abertura de una fisura debida a una presión P.	96
2.16. Inyección de una fisura con mezcla inestable	99
2.17. Ejemplo de resultados de inyección para cortinas de inyección	114
2.18. Ejemplo de curvas de inyección, mostrando varios caminos (Método P x V)	114
2.19. Curva de penetrabilidad (Método P x V)	114



2.20. Area de penetrabilidad vs. volumen de inyección	114
2.21. Límites de penetrabilidad de los morteros	117
2.22. Límites de penetrabilidad de los morteros	117
2.23. Inyección de contacto	128
2.24. Inyección de relleno	130
2.25. Socavamiento del techo de la galería de sondaje	131
2.26. Metodología de inyección con tubos de manguito	145 - 147
2.27. Ruptura de manguito	149
2.28. Inyección descendente (a y b)	151
2.29. Determinación de la calidad de una pantalla	156
3.1. Ubicación de las perforaciones en la camara de compresión	188
3.2. Ubicación de las perforaciones en la G.I.	189
3.3. Curva PxV para taladro P y S	193
3.4. Curva PxV para taladro T	194
3.5. Curva PxV para taladro C	195
4.1. Histograma de volúmenes de inyección	213
4.2. Ubicación de los taladros por categorías de un diagrama PxV/m <sup>2</sup> .	215

#### **FOTOS**

1.1. Terraza fluvial antigua y actual (vista desde la margen derecha)	6
1.2. Terraza glaciar antigua de la margen izquierda (vista desde la margen derecha)	8
1.3. Terraza glaciar antigua y joven de la margen derecha (vista desde la margen izquierda)	10
1.4. Deposito fluvio - glaciar de margen izquierda.	10
1.5. a. Deslizamiento antiguo de la margen izquierda	27
b. Observación del desnivel entre la parte alta y la cresta del deslizamiento (vista desde la margen derecha)	27
c. Campamento de Electrolima	27
d. Eje de pantalla	27
e. Espaldon aguas abajo	27
1.6. Pequeños deslizamientos que podrian causar cierto riesgo ubicados en el embalse de presa (margen izquierda)	31
1.7. Posibles sumideros ubicados en la terraza actual del valle glacial (zona de embalse)	31

2.1.	Aguja de Bicat	65
2.2.	a. Cono Marsh	72
	b. permeámetro	72
2.3.	a. Compresora para simulación de inyección	72
	b. Cilindro de mezcla	72
	c. Cilindro simulador de terreno	72
2.4.	Tubos de manguito o manchete	137
2.5.	a. Mezcladora	138
	b. Batidora	138
2.6.	a. Bomba de inyección	140
	b. Estabilizador de presión	140
2.7.	Registro automático	142
	a. Registro gráfico	142
	a.1. de presión	142
	a.2. de caudal	142
	b. Registro Digital	142
	b.1. de caudal	142
	b.2. de caudal acumulado durante la inyección	142
	c. Marcador de aguja	142
	c.1. de presión	142
	c.2. de caudal	142
2.8.	Obturadores hidráulicos	144
	a. Tubería de inyección	144
	b. Obturador doble	144
	c. Obturador simple	144

## CUADROS

2.1.	Criterios para logeo de suelos	64
2.2.	Resumen de los tipos de mezclas	76
2.3.	Características de las mezclas estables	81
2.4.	Permeabilidad en función del número y aberturas	97
3.1.	Cuadro de Datos de permeabilidad	168
3.2.	Presiones de rechazo	202
3.3.	Volumen de inyección en la G.I.	203
3.4.	Volumen de inyección en la C.C.	210
4.1.	Características geotécnicas del macizo rocoso en el Tramo de Estudio	219

## PLANOS

- 1.1. Geología del Sitio de Presa
- 1.2. Sección Longitudinal del Eje de Presa
- 1.3. Ubicación de los taladros SP y Canteras
- 1.4. Geología del Embalse
- 3.1. Sección Longitudinal del Tramo de estudio (Geología)
- 3.2. Mapeo Geológico geotécnico del tunel de investigación  
(Método del arco rebatido)
- 4.1. Ubicación definitiva de los taladros en la G.C.
- 4.2. Ubicación definitiva de los taladros en la G.I.

## SECCIONES LONGITUDINALES

- 4.1. Sección longitudinal de isocurvas de permeabilidad
- 4.2. Sección longitudinal de isocurvas de volúmenes de  
inyección
- 4.3. Sección longitudinal de RQD
- 4.4. Sección longitudinal de isocurvas alteración
- 4.5. Sección longitudinal de isocurvas fracturamiento
- 4.1. Sección longitudinal de isocurvas de permeabilidad tramo  
de estudios
- 4.3. Sección longitudinal de isocurvas de RQD tramo de estudios
- 4.4. Sección longitudinal de isocurvas de alteración tramo de  
estudios
- 4.5. Sección longitudinal de isocurvas de fracturación tramo de  
estudios

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCION

La Pantalla de Impermeabilización en una presa es parte primordial y esencial en ella, siendo su construcción muy compleja, en la que intervienen factores tales como tipo de roca, fracturamiento, permeabilidad, porosidad, etc., todos referidos al macizo rocoso o suelo, según sea el caso. Los principales objetivos que motivan la presente tesis son:

- a. Contribuir con una mayor información de este tema, ya que es sabido que la experiencia a nivel nacional en este tipo de investigaciones y su aplicación es muy escasa.
- b. Realizar un breve resumen de la parte teórica del tema *inyecciones de impermeabilización*.
- c. Contribuir en la construcción de la Pantalla de Impermeabilización con los resultados obtenidos en el presente estudio.

d. Permitir el acceso del alumnado universitario a estos conocimientos para complemento de sus estudios.

## **1.2. UBICACION Y ACCESO**

### **1.2.1. Ubicación**

El Proyecto Presa Yuracmayo está ubicado políticamente en el Distrito de San Mateo, Provincia de Huarochirí, Departamento de Lima (FIG. N° 1). Geográficamente se halla en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes. Sus coordenadas son:

9,774 Este

20,159 Norte

La corona de la presa tendrá una cota de 4319 msnm y se encuentra a 122 Km de la Ciudad de Lima.

### **1.2.2. Acceso**

Para llegar a la obra se hace vía Carretera Central, hasta el kilómetro 102, en la zona denominada Río Blanco; a partir de allí se continúa por trocha durante 20 Km.

## **1.3. ASPECTOS GEOLOGICOS**

En la zona del proyecto, el valle del Río Blanco, tiene características de un típico valle glaciar, con fondo plano cubierto por depósitos aluviales, pantanos y flancos rocosos empinados. También se pueden observar morrenas a ambos lados del valle. La zona está



intensamente plegada y fracturada, prueba de ello son los anticlinales y sinclinales así como las fallas que se presentan en el área.

### 1.3.1. Geomorfología

El valle del río Yuracmayo posee dos zonas morfológicas bien diferenciadas:

- Zona de valle glaciario (en sus nacientes).
- Zona de valle fluvial (curso medio e inferior).

La primera va desde la parte baja de los afloramientos rocosos (nacimiento del río Yuracmayo) ubicada a 10 Km aguas arriba del eje de presa, llegando a 7 Km aguas abajo del mismo; de esa distancia hasta la unión con el río Rímac (20 Km aguas abajo de la presa) se ubica el valle fluvial. Las cotas van desde los 3,800 msnm hasta los 5,400 msnm, lo cual origina que se presenten diversos climas.

En el área del proyecto se han logrado ubicar cuatro unidades geomorfológicas, las cuales son:

- a. **Zona de afloramientos rocosos:** Estos se les ubica en las partes altas del valle rodeado las nacientes y cabeceras del río, con cotas que llegan hasta los 5400 msnm. En la zona del valle glaciario estos afloran a partir de la cota 4500 en el mismo eje de presa, pero a 4 Km aguas arriba se les aprecia en el mismo lecho del río y se extienden hasta las partes altas de las laderas con pendientes variables. Entre los 2

y 4,5 Km aguas arriba del eje de presa la pendiente en la margen izquierda es de  $70^\circ$ , mientras que en la ladera derecha es de  $60^\circ$ . Las rocas en esta zona se encuentran formando un anticlinal, consistiendo su litología en aglomerados volcánicos, tufos y brechas no diferenciadas de la Formación Carlos Francisco. En las partes altas y con menor pendiente se observan, en la margen izquierda, calizas de la Formación Jumasha.

En las partes altas de estos afloramientos, a 5 Km de la presa, estas rocas están formando circos glaciares, llegándose a observar el nivel de nieve perpetua.

Desde 2 Km aguas arriba hasta 7 Km aguas abajo del eje de presa los afloramientos rocosos se siguen observando en las partes altas, siendo afectadas por la acción erosiva del hielo. Las pendientes son de  $40^\circ$  a  $50^\circ$  en ambas márgenes; la superficie es abrupta, con características similares a la zona descrita en la parte inicial.

Además se les observa en las laderas altas que rodean la zona con características de valle fluvial a partir del curso normal del río.. Este se encañona a la altura del poblado de Chocna, con pendientes que llegan a  $75^\circ$ , para luego bajar a  $45^\circ$  en las partes altas. A la altura del poblado de Caruya el valle se abre ligeramente, llegando a medir 50 m; la pendiente



de los afloramientos baja a  $40^\circ$  en las partes bajas en las partes altas llega a  $60^\circ$ .

- b. Terrazas fluviales:** Se ubican en el curso medio cubriendo depositos del valle glaciar antiguo apreciandose dos terrazas fluviales, una antigua y otra actual. A 200 m aguas arriba del eje de presa se aprecian ambas terrazas, formadas por turba. La terraza actual tiene un ancho de 80 m en esta zona, con una pendiente de  $5^\circ$ ; el río discurre divagante formando meandros. En la terraza fluvial antigua la pendiente aumenta a  $8^\circ$ , desapareciendo a 300 m del eje (FOTO 1.1). La diferencia de nivel de una y otra es de 15 m.

Aguas arriba, la pendiente de la terraza actual disminuye ligeramente a un promedio de  $3^\circ$ , manteniéndose la turba como depósito principal. Esta característica se mantiene hasta los afloramientos ubicados a 5 Km aguas arriba. El ancho de la terraza aumenta progresivamente siendo su parte más ancha de 500 m, ubicándose a 3,5 Km del eje de presa. En gran parte de la terraza de inundación se aprecian, en lo que al parecer podrían ser sumideros. A 350 m del eje la planicie se reduce a 200 m debido a la presencia de un depósito aluvio - coluvial.

Aguas abajo, hasta los 7 Km del eje de presa, sólo se observa una terraza actual con las mismas características que tiene esta terraza aguas arriba.

En la zona del valle fluvial se han ubicado varias terrazas fluviales, especialmente en el poblado de Caruya donde se tienen 2 terrazas, con una diferencia de cotas de 5m.

**c. Terrazas glaciares:** Se localizan en el eje de presa y al vaso del reservorio, se pueden observar dos terrazas glaciares, siendo más notoria la terraza antigua de la margen izquierda (FOTO 1.2) encontrándose en la parte alta pequeñas lagunas que alimentan a las quebradas de la zona, las cuales desembocan aguas abajo de la presa; esta terraza se prolonga hasta aproximadamente 1000 m aguas abajo del eje de presa. El material sobre el cual se ha formado esta terraza es una morrena lateral formada en el último período de glaciación cuaternaria que afectó el área.

En la margen derecha ambas terrazas son más notorias, pero a 700 m del eje de presa, prolongándose hasta 1200 m hacia abajo (FOTO 1.3). La más antigua se ubica 80 m por encima del lecho del río mientras que la más joven se halla a 45 m. Estas terrazas han sufrido un modelado posterior por agentes erosivos como el agua, el hielo, etc., los que han originado que no se les ubique en forma continua, apreciándose algunas veces la más joven o la más antigua, esporádicamente ambas o ninguna, como ocurre en la margen izquierda y derecha de la presa en el mismo eje. Aguas más abajo no se aprecian este tipo de unidades geomorfológicas.

1.1. Terraza fluvial antigua y actual  
(vista desde la  
margen derecha)



1.2. Terreza glacial  
antigua de la  
margen izquierda  
(vista desde la  
margen derecha)ö

**d. Zonas de acumulaciones de laderas:** Comprende las cotas intermedias entre los afloramientos rocosos y los fluvio glaciares (FOTO 1.4) cubriendolos con material coluvial con pendientes que oscilan entre 10 y 30 grandos, consistente de bloques y gravas originados por el desprendimiento de las rocas aflorantes debido a la acción de cuña del agua Hielo y la fuerte pendiente.

### **1.3.2. Afloramientos rocosos**

Una extensa secuencia estratigráfica tiene exposición en la región. En la zona del proyecto sólamente aflora la parte superior de la columna estratigráfica de los Andes Centrales, representada por formaciones volcánicas pertenecientes al Terciario Medio e Inferior sobreyaciendo afloramientos calcáreos del Cretáceo Medio o Superior y al Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior- las que se encuentran fuertemente plegadas. A continuación se hace una breve descripción de las columnas geológicas poniendo énfasis en aquellas que por su situación en el área están o serán comprometidas con las obras del proyecto de presa y embalse. Como referencia de este item se ha tomado el estudio hecho por el Ing. Salazar (INGEMMET) del levantamiento geológico de la hoja de Matucana.

**a. Grupo Goyllarisquizga:** Este grupo consiste en una secuencia de areniscas con intercalaciones de cuarcitas y lutitas. En el lado occidental se describen como cuatro formaciones: Chimú, Santa,



1.3. Terraza glaciar antigua y joven de la margen derecha (vista desde la margen izquierda)



1.4. Deposito fluvio - glaciar de margen izquierda. Se observa la estratificación del material

Carhuaz y Farrat, siendo la Formación Santa carbonatada y las tres restantes formaciones cuarcitas o areniscas con diversas características litológicas.

- b. **Formación Chulec:** Sobreyace a la formación anterior y está compuesta de calizas.
- c. **Formación Pariatambo:** Litológicamente consiste en calizas intercaladas con margas bituminosas.
- d. **Formación Jumasha:** Consiste de caliza color gris, con estratificación mediana y gruesa, con abundante pirita y venas de calcita rellenando fisuras, producto del tectonismo; en al área aflora a manera de lentejones mediante fallas.
- e. **Formación Casapalca:** Es una secuencia de rocas clásticas que consisten de intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas.
- f. **Formación Carlos Francisco - Grupo Rímac:** En la zona alta de la Cordillera Occidental aflora una secuencia de rocas volcano-sedimentarias que yacen en aparente concordancia sobre la Formación Casapalca. Esta formación conforma el basamento rocoso en el sitio de la Presa y Embalse Yuracmayo.
- g. **Formación Bellavista - Rio Blanco - Grupo Colqui:**
  - g.1. **Formación Bellavista:** Esta unidad consiste en calizas margosas, tufos finos, andesitas

tufáceas, lutitas y limolitas gris verdoso a pardo rojizo.

**g.2. Formación Río Blanco:** En ambos flancos del sinclinal de Río Blanco aflora una potente secuencia de tufos lapillíticos y areniscas tufáceas, con intercalaciones de brechas tufáceas y aglomerados finos.

**g.3. Grupo Colqui:** Con este nombre se designan una gruesa capa de derrames andesíticos porfíricos, tufos lapillíticos y aglomerados.

**h. Formación Millotingo:** Está constituida por una secuencia de derrames volcánicos andesíticos y riódacíticos intercalados con grauwacas formadas por material volcánico.

### **1.3.3. Suelos**

Los depósitos morrénicos, coluviales, fluvio-glaciares y aluviales se ubican en las partes bajas de los valles. Están formados por gravas, bolones y bloques con una matriz que puede ser arcillosa, limosa o arenosa. Los tipos de suelos presentes son:

**a. Depósitos morrénicos:** Están constituidos por arenas limosas conteniendo abundantes fragmentos de roca subangulosa de diversos tamaños, sin selección. Aparecen como potentes morrenas laterales o frontales en los numerosos valles glaciares de la zona.

- b. Depósitos fluvio - glaciares:** Material acarreado por los ríos, proveniente de la erosión de las morrenas y depositado en la parte central del valle. Generalmente constituido por gravas arenosas o arenas arcillosas con capas de gravas. En algunos casos hay depósitos de arcilla.
- c. Depósitos aluviales:** Formados por gravas y arenas limosas. Se encuentran depositados en los cursos medio a inferior de los ríos que bajan hacia la costa. Forman en muchos casos barrancos y terrazas aluviales en las márgenes de las quebradas, generalmente cubiertos de turba.
- d. Depósitos coluviales:** Material anguloso con matriz arcillo-limosa, formado por la erosión de las laderas rocosas.
- e. Depósitos de turba:** Consiste de arena y limos orgánicos, saturados de agua, color gris oscuro a negro, que ocupan la parte baja y plana del fondo del valle, cubriendo a los depósitos aluviales; su potencia puede alcanzar 10 m.

#### **1.3.4. Condiciones Estructurales**

El área se halla dentro de la faja volcánica Terciaria con fuertes plegamientos y fallas. El rumbo general de los plegamientos es NW, ocupando la parte alta del valle del Río Blanco o Yuracmayo, el mismo que se ubica en un largo anticlinal (Salazar H., 19829).



Existen varias fallas compresionales regionales de gran importancia que han levantado bloques de la caliza Cretácea Jumasha dentro del volcánico Terciario Carlos Francisco, aflorando a manera de lentes (Salazar H., 1982). Una de estas zonas de falla se observa en la parte alta de la zona del embalse de Yuracmayo y otra en las cumbres del flanco SW del valle del Río Blanco.

El embalse está dominado por un anticlinal fallado a lo largo de su eje longitudinal; en esta zona las capas de la margen izquierda buzcan  $40^\circ$  SW y los de la margen derecha  $30^\circ$  NE.

La zona estuvo afectada por la Tectónica Incaica (Fase Poroche) la misma que plegó y falló a las secuencias volcánicas sedimentarias de las formaciones Terciarias. Las principales estructuras observadas en la región son:

- a. **Fallamiento Inverso del Puente Infiernillo en el valle del Rímac:** Consiste en dos fallas con rumbo NW - SE que cortan a las Calizas Jumasha y dos miembros de la Formación Carlos Francisco (Salazar H., 1982).
- b. **Sinclinal Chicla - Río Blanco:** Tiene una dirección NNW - SSE; hacia el SE se halla fallado (Salazar H., 1982)

En las partes altas del valle se aprecia una serie de anticlinales y sinclinales con dirección NW - SE. Son abiertos y de buzamientos ligeramente suaves; su extensión es corta.

#### **1.4. GEOLOGIA LOCAL**

Esta ha sido dividida en dos zonas para un mejor estudio: Geología del sitio de Presa y Geología del embalse de Presa.

Ambas zonas están ubicadas en un valle glacial, por lo que se pueden apreciar depósitos típicos ligados a este tipo de erosión.

##### **1.4.1. Geología del sitio de Presa**

Se han ubicado varias unidades litológicas (PLANO 1.1). El basamento rocoso esta constituido por tufos volcanicos, mientras que las capas superiores son depositos cuaternarios. En líneas generales la estabilidad de las laderas no presentan problemas.

**a. Características geológicas y geotécnicas de las unidades:** En la zona del sitio de presa se aprecia un relieve modelado por el hielo lo que ha originado un valle glacial en "U". Las unidades encontradas en el área son (PLANO 1.2):

**a.1. Rocas del substrato rocoso:** Conforman la mayor parte de la margen derecha, especialmente del eje hacia aguas abajo, y por lo tanto tienen un impacto importante sobre el proyecto, ya que todos las obras hidráulicas se ubican en esta área.

## ORIGEN GEOLOGICO Y LITOLOGICO

Las rocas del estribo derecho y fondo del valle glaciar son de origen volcánico sedimentario, muy potente, cuya edad es Terciario Superior (40 - 17 m. a.). La serie del sitio es piroclástica con microbrechas, tufos (tobas) de ceniza, de origen andesítico y riolítico dácítico, con colores parduzco -morado, verdoso y blanco verdoso (*Blanc B. & Farfán M., 1983*).

## ESTRUTURA

La formación está afectada por una estratificación, la mayoría de las veces poco aparente, la cual se debe al poco desarrollo de las juntas de estratificación como a la fracturación extrema del material, factor que oculta las demás características estructurales (*Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983*). Sobre la falda que domina el río, las capas tienen un rumbo aproximado de N 50° W con un buzamiento de 15° al NE. En los túneles se ha observado que las capas tienen un buzamiento al SW, por lo que se ha determinado que la margen derecha es una estructura sinclinal.

#### FRACTURACION Y ALTERACION

La roca de la margen derecha está fuertemente fracturada hasta una profundidad de 30 m, con abundancia de discontinuidades, de orientaciones variadas y buzamientos generalmente fuertes. Hasta los 20 m de cobertura la roca está extremadamente fracturada (desagregada), con abundante relleno de fracturas de composición arcillosa y arena limosa. La geometría de estos rellenos sugiere que se trata mayormente de depósitos secundarios, formados por aguas infiltradas desde superficie. Una parte del relleno proviene de la alteración propia de la roca, muy pronunciada en este tramo (*Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983*).

A partir de 30 m hacia abajo la estructura de roca comienza a ser identificable, pero continúa extremadamente fracturada hasta los 60 - 70 m de profundidad, por debajo de la cual la roca tiene valores altos de RQD (60 - 90 %).

#### PERMEABILIDAD

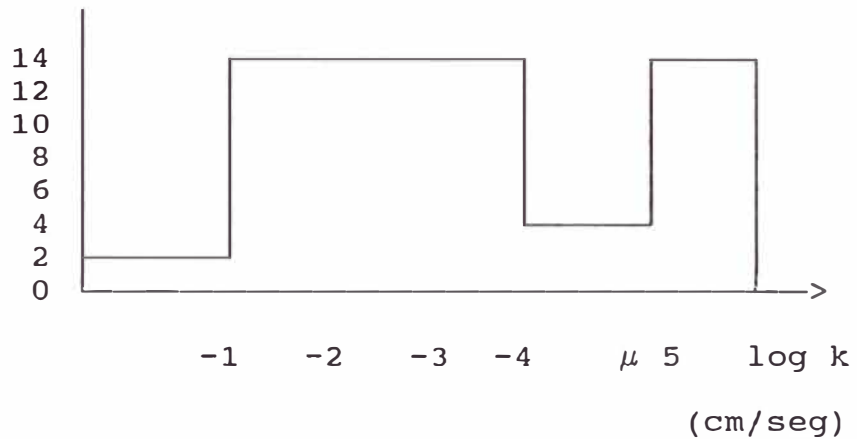
Por el estado muy fracturado de la roca, sólo un número limitado de ensayos Lugeon pudieron ser llevados a cabo en condiciones normales. Pero son excepcionales los casos en que la presión nominal de 10 Kg fue alcanzada. Los valores

aproximados fueron (datos obtenidos durante el Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo):

SP-2	69.70	- 74.70 mt	: 9 Lugeon
SP-3	29.90	- 35.60 mt	:22 Lugeon
SP-5	46.50	- 50.00 mt	: 6 Lugeon
SP-5	50.00	- 53.00 mt	:11 Lugeon

Los demás ensayos fueron realizados según el sistema Lugeon. Los resultados se presentan en el siguiente gráfico:

Nro. de Ensayos



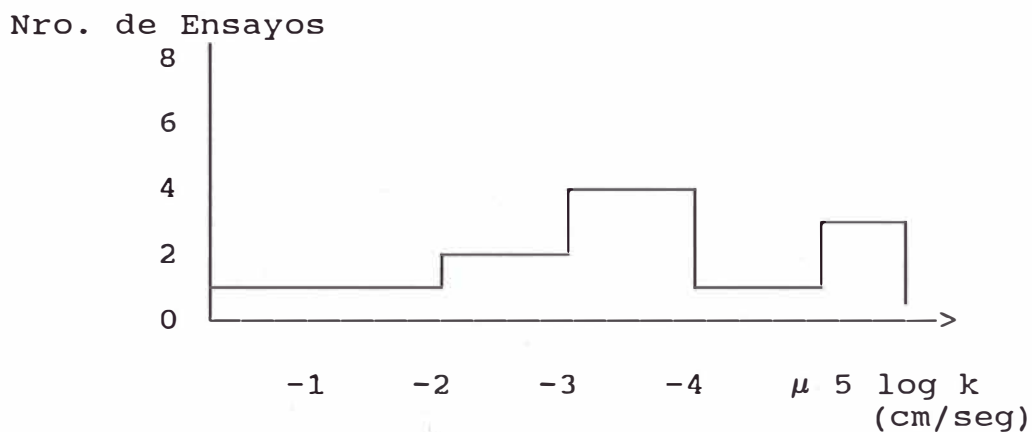
NOTA: La ubicación de los sondajes Sp. se presentan en el plano 1.3

**a.2. Morrena de Fondo:** Está formada por bloques y gravas mal graduadas de roca unidas con una matriz limo - arenosa. Tiene una profundidad promedio de 25 m, siendo en su parte más ancha

de 42 m, reduciéndose hacia la margen derecha (Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983).

#### PERMEABILIDAD

Los valores de permeabilidad medidos en perforación por pruebas Lefranc (absorción y bombeo) se presentan en el siguiente histograma (obtenidos de los ensayos realizados durante el Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo):



En Sp - 1, un ensayo de bombeo realizado en una zona con abundantes bolones a 58 m de profundidad y con agua artesiana, ha proporcionado un valor de  $k$  superior a  $10^{-2}$  cm/seg. Este valor es probablemente representativo, sin embargo, vale mencionar que los ensayos de bombeo en materiales gravo - arenosos sometidos a presión artesiana tienden a proporcionar valores de permeabilidad superiores al promedio (Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983).

**a.3. Depósito lagunar y fluvio lagunar:** La formación de lagunas es un fenómeno extremadamente común en los valles recién abandonados por los glaciares en que los relieves construidos (morrenas) y los perfiles de erosión irregulares (umbral glaciar) representan condiciones favorables para el embalsamiento de las aguas, apoyados sobre taludes de pendiente marcada. Esas lagunas pueden llegar a tener profundidad notable con respecto a las dimensiones horizontales

La laguna interglacial del sitio ha tenido así una profundidad que alcanza casi el tercio de su dimensión transversal su extensión longitudinal es desconocida, pues los relieves responsables del embalsamiento ubicadas aguas abajo del eje de presa (probablemente una morrena frontal), han sido erosionadas por la última glaciación.

La superficie superior, del depósito es un relieve de erosión fluvial bajo el lecho del río, y probablemente de erosión glaciar bajo la margen izquierda, aunque en este caso la erosión debe haberse limitado a unos pocos metros (*Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983*).

Los depósitos de facies típicamente lagunares están constituidos de materiales muy finos (limos y arcillas) sedimentados en aguas tranquilas. La presencia de material más grueso

refleja una sedimentación de agua poco profunda o próxima a zonas de alimentación y de los orillas.

En la margen izquierda se halla un depósito arenoso limoso el cuál se extiende hasta la orilla izquierda del depósito lagunar. En el lecho del río este depósito se halla debajo de materiales aluviales a una profundidad de 10 m, compuesta por arena muy fina, limo y clastos. El espesor de estos materiales de característica aluvial y el hecho de haberse encontrado dentro de él intercalaciones lagunares, nos indican un origen fluvio lagunar más que fluvial. Se trataría de depósitos deltaicos acumulados donde el río de la época interglaciar desembocó en la laguna.

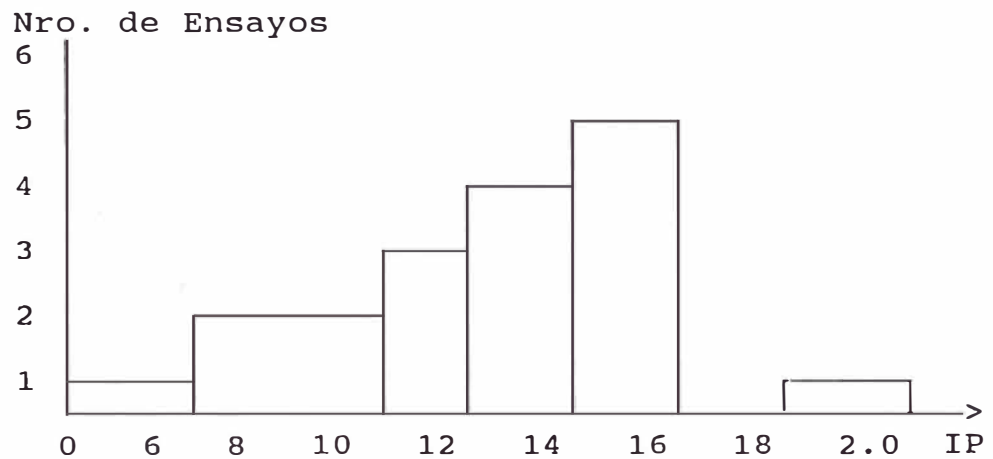
#### EL MATERIAL LAGUNAR

El material lagunar es muy puro y presenta laminaciones frecuentes de 0,5 a 0,8 cm, con intercalaciones delgadísimas (< 0,5 mm) de arena muy fina. En estado húmedo el material es plástico. En estado seco tiene más la característica de un limo muy compacto con tendencia a pulverizarse por presión moderada entre los dedos (*Steiger R., Moril E. & Farfán M., 1983*). Los ensayos granulométricos indican un material predominantemente limoso, con 5 a 50 % 25 % de arcilla y menos de 5 % de arena.



Según los límites de Attemberg el material se clasifica como CL, arcilla limoso, con un límite líquido de 29 y un índice de plasticidad de 13 como promedio.

El histograma de frecuencia de valor de IP, para 19 muestras de Shelby extraídas de todas las perforaciones realizadas en el lagunar, se presenta en la siguiente figura:



Las muestras (tomadas a profundidades entre 9 y 59 m) no demuestran ninguna relación entre la profundidad de extracción y el valor de IP. Algunos lentes de arena finísima, de 5 a 20 cm de espesor, se encuentran en la parte superior del depósito.

El material se halla saturado entre el 90 y 100 % y en estado plástico en promedio; el contenido de agua natural es de 21 %. Su índice de consistencia corresponde a 0,5, osea, el material es firme. El peso específico natural es cercano a 2 gr/cc. El valor de penetración

estandar es muy alto, con  $N = 100$  en el 70 % de los ensayos.

Este material se considera impermeable, ya que los valores de los ensayos Lugeon efectuados son de alrededor de  $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  cm/seg.

#### MATERIAL FLUVIO - LAGUNAR

Se trata de gravas arenosas subredondeadas y arenas gravosas con proporción a veces notable de limos y presencia esporádica de bolones. El material en el mismo sitio de presa es más compacto que los aluviones recientes, por haber sufrido los efectos de la última glaciación.

Los ensayos de permeabilidad nos dan valores altos que van de 4,4 a  $4,4 * 10^{-2}$  cm/seg.

- a.4. Morrena frontal reciente:** Este es un depósito diamíctico típico, es decir, una mezcla poco o mal clasificada, de grava, arena y finos (arcilla y limo). En los niveles de granulometría diferenciada en que predomina una u otra fracción se encuentran: bolones, arena, gravilla, grava uniforme con finos, limos, etc. ^

El material mas común es una mezcla mal graduada de 35 a 65 % de grava ( $\emptyset$  63 mm), 20 a 60 % de arena, 5 a 20 % de arcilla y limo, y se puede clasificar según SUCS- como CP, GM, SP, SM.

Las gravas son subredondeadas a subangulosas, con  $\phi$  máximo generalmente inferior a 70 mm; la fracción superior a 100 es poco representada. Hay algunos bloques erráticos ( $\phi$  1 m o algo mas)

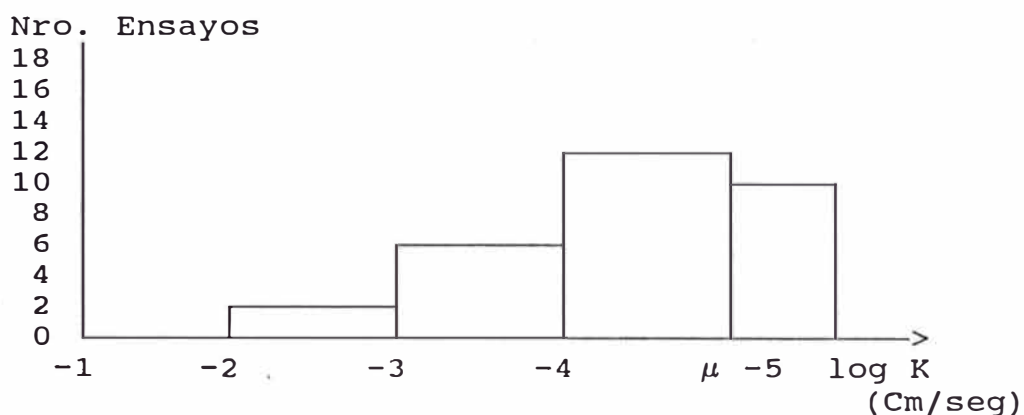
El índice de plasticidad de la fracción fina es inferior a 6 %, con 75 % de los valores inferior a 5%, lo que corresponde a una proporción de arcilla inferior a aproximadamente 15 % de la fracción fina.

El material tiene un peso específico natural de 2,2 gr/cc en promedio (0,5 % de los valores entre 2 y 2,4 gr/cc) con un contenido de agua bastante variable cuyo promedio se ubica alrededor de 11 %.

Esta estructura, al parecer, no es una morrena frontal, sino un depósito fluvio - glacial, ello debido a que se aprecia estratificación gradada, ligeros plegamientos, cantos sub-redondeados, etc (FOTO 1.4) Según F. Liñán (1992), esta formación podría tratarse de un deslizamiento de la morrena lateral. Para establecer exactamente de que se trata este depósito se deben efectuar mayores estudios, los mismos que escapan al presente informe.

La permeabilidad de este depósito fue determinada mediante ensayos Lefranc durante el

Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo. Los resultados se presentan en forma de histograma en la figura siguiente:



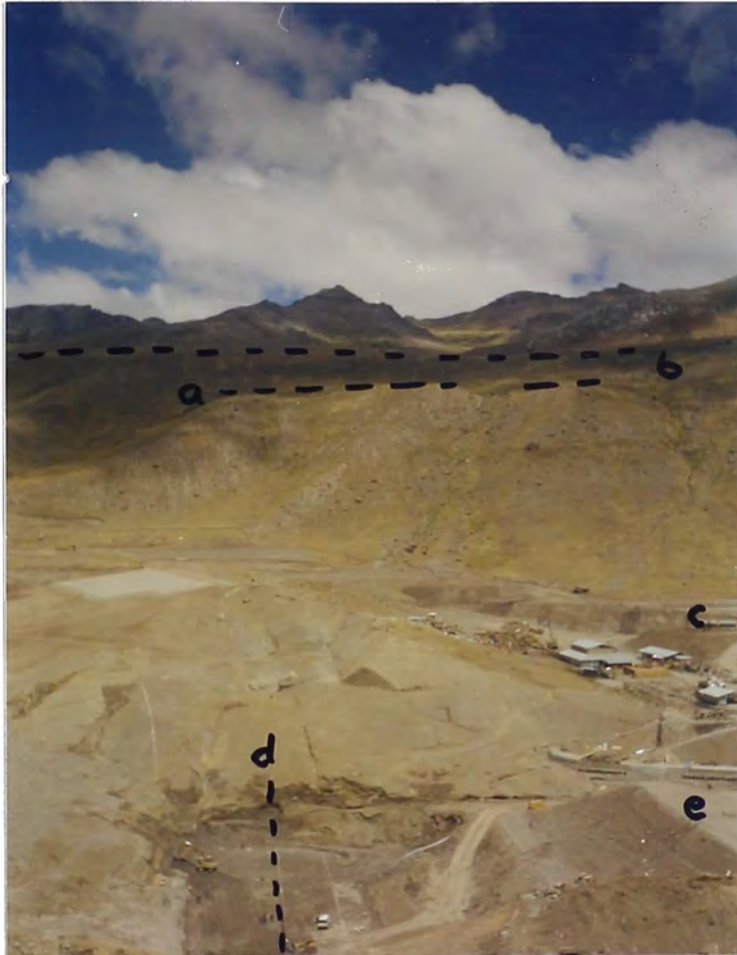
**a.5. Aluviones Recientes:** En la planicie fluvial y por debajo de la capa turbosa existen gravas areno - limosas relleno de un canal de 6 a 10 m de profundidad, contando los depósitos lagunares. Es la evidencia de esta acción erosiva del río la que permite atribuir sin ambigüedad un origen fluvial al material de relleno, pues éste tiene más el aspecto de una morrena retrabajada que el de un aluvión fluvial. Las gravas son subangulosas a subredondeadas, y la proporción de finos es notable comparable a la de la morrena. El valor promedio de la permeabilidad es  $1,2 * 10^{-3}$  cm/seg (Steiger M., Moril E. & Farfán M., 1983).

**b. Estabilidad de laderas en la zona de presa:** Las laderas y taludes que dominan la presa o constituyen sus apoyos presentan buenas condiciones de estabilidad natural. Los pendientes máximas, de  $25^\circ$  y

en la morrena y en la roca alterada respectivamente, son inferiores a los ángulos de reposo. El sistema de drenaje previsto en ambas laderas agua abajo de la presa, asegura la permanencia de las condiciones de equilibrio, luego de relleno del embalse (*Steiger M., Moril E. & Farfán M., 1983*).

Cabe mencionar que se ha podido identificar un deslizamiento antiguo ubicado en la margen izquierda (FOTO 1.5), sobre la morrena lateral. Este tiene aproximadamente unos 200 m de largo; su cresta es visible con un desnivel de 20 m con respecto a la parte alta de la morrena. No se sabe si su superficie de deslizamiento afectará a la presa, pero existen pocas posibilidades que se reactive.

- c. Aguas Subterráneas:** Durante las perforaciones iniciales, en el estudio de prefactibilidad, se realizaron mediciones del agua subterránea, del cual se concluyó que existía un nivel freático en la margen izquierda cuya cota máxima es 4284 msnm, con flujo dirigiéndose hacia el lecho del río. En la margen derecha sucede algo similar; se ubicó el nivel freático a 4285 msnm. Este nivel de agua está alimentado probablemente por fuga de agua a partir de una acequia que corría algo más arriba sobre la ladera. En este estribo se ha podido apreciar que el agua se infiltra entre la roca y la morrena que la cubre



- 1.5 a) Deslizamiento antiguo de la margen izquierda.  
b) Observese el desnivel entre la parte alta y la cresta del deslizamiento (vista desde la margen derecha).  
c) Campamento de Electrolima  
d) Eje de Pantalla  
e) Espaldon Aguas Abajoö

En la morrena lateral izquierda se aprecian varias surgencias de agua los cuales están alineados; alimentan a las quebradas circundantes a la obra.

#### 1.4.2. Geología del embalse de Presa

a. **Características geológicas:** En la zona del embalse se halla una capa morrénica de características semejantes a los de la morrena de fondo (PLANO 1.4). En la zona de la cantera de agregados ubicada a 5 Km. agua arriba del eje de presa la morrena subyace a una capa superficial fluvio glacial de 2 a 4 m de espesor constituida por gravas redondeadas y arenas con porcentaje notable de finos. En esta misma zona, a una profundidad de 11,50 y 16,80 m, existe una capa con abundantes bolones que representa probablemente la parte inferior gruesa de la morrena de fondo en contacto con la roca (*Blanc B. & Farfán M., 1983*).

En una perforación efectuada en la ladera de los afloramientos rocosos esta morrena cubre a las calizas de la Formación Jumasha, la cual aflora sobre la ladera a poca distancia de la perforación. Cabe mencionar que esta perforación se halla en una zona de cantera. Esta caliza pertenece a la faja fallada determinada tanto por los levantamientos de superficie como por los sondajes geoelectricos. Sobre toda la longitud perforada (hasta 50 m de profundidad) el material se halla bastante fracturado pero no presenta ningún indicio de karstificación (*Steiger M., Moril E. & Farfán M., 1983*).

Los afloramientos de caliza de la ladera izquierda se hallan en forma discontinua y disminuyen aguas abajo, tanto así que el último bloque de importancia se halla a 2,6 Km del eje de presa; luego las calizas se hunden bajo el reservorio, hallándose a más de 100 m de profundidad.

Los riesgos de fuga de agua en el embalse, según Steiger M., Moril E. & Farfán M. (1983), en los costados o en el fondo, se deben evaluar a partir de las siguientes características geológicas:

- El fondo del embalse está cubierto por una capa de material morrénico de permeabilidad medianamente baja, cuyo espesor supera los 15 m.
  - Una capa de material más grueso y de mayor permeabilidad subyace a la morrena poco permeable. Esta capa no ha sido observada en el afloramiento.
  - Las calizas tienen afloramientos de extensión limitada a lo largo de la faja fallada de margen izquierda hasta una distancia de 2,6 Km aguas arriba del sitio. Están fracturadas pero no karstificadas.
- b. Estabilidad de laderas:** (Tomado del Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo, Vol. VII Geotecnia y materiales) De modo general las laderas empinadas están constituidas por roca y, aún cuando éstas suelen presentarse con intensa fracturación y meteorización, sus características estructurales no



hacen suponer que el equilibrio gravitacional se vea comprometido. Se trata de macizos rocosos donde los planos de discontinuidad (falla, estratificación, fracturas) no son conspicuas y en otros casos, tal como la estratificación, no favorecen el trabajo de la gravedad.

De otro lado no se han encontrado evidencias que respalden la posibilidad mediata de deslizamientos y/o derrumbes de las áreas comprometidas por el embalse.

Todas las superficies que serán mojadas luego del llenado del embalse presentan condiciones de estabilidad natural aceptable y, aún cuando se trata de materiales inconsolidados, la posibilidad de deslizamientos menores por saturación de agua no parecen significar un riesgo siquiera mediano.

El vaciado rápido del embalse podría provocar pequeños deslizamientos sobre todo en los depósitos cuaternarios (coluviales y morrénicos), pero los volúmenes implicados y su dinámica no serán suficientes para constituir un peligro serio.

A 800 m. aguas arriba del eje de presa se ha ubicado una zona de posible deslizamiento, consiste en varios deslizamientos pequeños (Foto 1.6). Estos se hallaran debajo del espejo de agua, pero un vaciado rapido podría provocar un deslizamiento del material siempre y cuando este se halle saturado de agua.



1.6. Pequeños deslizamientos lo que podrían causar cierto riesgo



1.7. posibles sumideros ubicados en la terraza actual del valle glacial (zona de embalse)

**c. Permeabilidad de la roca:** El grado de fracturación impide la ejecución de ensayos Lugeon, pero 7 ensayos Lefranc a nivel constante se efectuaron entre 20,10 y 50 m de profundidad obteniéndose valores que oscilan entre  $1,5 \cdot 10^{-3}$  (máximo) y  $2,9 \cdot 10^{-4}$  (mínimo). Estos valores pueden ser algo exagerados pues no hay control de posibles fugas de agua entre la pared del pozo y el tubo de revestimiento (*Steiger M., Moril E. & Farfán M., 1983*) Las fracturas en general poseen un relleno de arcilla consistente y cohesivo como se puede apreciar en los testigos de perforación.

Las características descritas inducen a concluir que en el área no existe riesgo de pérdida de agua en la zona de cierre, la cual será provista de su propio sistema de estanqueidad.

Cabe mencionar que en la terraza actual del valle, en el embalse se han ubicado áreas de infiltración que al parecer serían sumideros (Foto 1.7). Estos se hallaron entre los 500 a 900 m. del eje de presa. Para descartar o no la presencia de estos se debe realizar un estudio más detallado.

#### **1.4.3. Estudio de canteras**

(Tomado del Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo, Vol. VII - Geotecnia y materiales).

En principio están a disposición tres tipos de materiales que proceden de morrenas, aluviones y rocas. Como materiales morrénicos pueden utilizarse las

terrazas que se encuentran ubicadas en los flancos inmediatos al eje de la presa. Materiales que pueden ser utilizados como agregados para el concreto y filtros cuya procedencia es aluvial se encuentran en grandes cantidades a 3 Km de distancia aguas arriba del sitio de presa. El material rocoso para emplearlo como rip - rap, filtro o agregado para concreto tiene que ser traído de lugares bastante alejados de la zona de la presa, ya que en las proximidades sólo se nota la presencia del material volcánico. Las canteras que se emplean son:

**a. Cantera de morrena margen izquierda:** Esta se ubica 50 m aguas arriba del eje de presa; los depósitos provistos como materiales para el cuerpo de la presa forman parte de una morrena lateral que superficialmente está cubierta por depósitos coluviales retrabajados con similares características.

El depósito señalado para su utilización es una franja paralela al Río Blanco, de aproximadamente 500 m de largo por 200 m de ancho (PLANO 1.3).

La composición esencial del depósito es: bloques y gravas en una matriz arenosa limosa; la cubierta superficial presenta algún contenido orgánico y restos de plantas que en promedio alcanzan unos 0,5 m de profundidad; el espesor utilizable en promedio alcanza unos 8 m.

El volumen a utilizarse de esta cantera es aproximadamente 800000 m<sup>3</sup>. Este material es apropiado para el núcleo de la presa debido, entre otras razones, a su impermeabilidad relativamente baja; así mismo puede ser utilizado como espaldón o cuerpo de apoyo por su buena capacidad portante.

Su baja plasticidad es sin embargo un problema, lo mismo que su curva granulométrica relativamente plana, por lo que exigen un buen dimensionamiento del filtro a fin de evitar erosiones internas.

- b. Cantera de morrena margen derecha:** La cantera estudiada se ubica a 50 m aguas arriba del sitio de la presa, en la zona inmediata dentro de la margen derecha (PLANO 1.3); los materiales aptos constituyen parte de los depósitos de la morrena lateral, la que superficialmente está cubierta por depósitos coluviales de similares características que la morrena de donde provienen.

Este depósito es una franja de aproximadamente 400 m de largo por 200 m de ancho; su composición es esencialmente bloques y gravas en una matriz areno - limosa con poca arcilla; superficialmente la cantera presenta una capa de 0,6 m de espesor con contenido orgánico y restos de plantas; el espesor utilizable alcanza 5 m.

El volumen utilizable es aproximadamente 400000 m<sup>3</sup>. La utilización de esta morrena es la misma que el de la morrena izquierda.

- c. Cantera de aluviones:** Los depósitos aluviales previstos a utilizarse como agregados para concreto conforman una amplia superficie aluvial al nivel de aproximadamente 3 Km. (PLANO 1.3).

El mencionado depósito aluvial es una franja de aproximadamente 1 Km. de longitud por 200 m de ancho, siguiendo el curso del río; su composición media son gravas arenosas de buena calidad, con algo de finos, especialmente a partir de los 5 m de profundidad, en sentido transversal al valle. Estos depósitos están influenciados por materiales coluviales provenientes de las laderas, sin comprometer la uniformidad del depósito para los fines de su utilización.

Se debe mencionar que la cantera en su totalidad está saturada de agua, por lo que se preveerá su explotación en tales condiciones. Las características geotécnicas son:

Límite líquido	27,21 %
Límite plástico	15,13 %
Índice plástico	12,08 %

De estos datos se deduce la presencia de pequeños porcentajes de arcilla, lo que implica un buen lavado

previo a su uso, ya sea como filtro o agregado de concreto.

Se ejecutaron numerosos proctor standart, siendo el promedio de los resultados el siguiente:

En Perú : Máxima densidad seca: 1,9 t/m<sup>3</sup>

Húmedad óptima : 9,75 %

En Suiza : Máxima densidad seca: 2,04 t/m<sup>3</sup>

Húmedad óptima : 9,6 %

Los valores máximo, mínimo y promedio de la densidad relativa son los siguientes:

	Máximo	Mínimo
Mínima	2,01 t/m <sup>3</sup>	1,51 t/m <sup>3</sup>
Promedio	2,12 t/m <sup>3</sup>	1,61 t/m <sup>3</sup>
Máxima	2,18 t/m <sup>3</sup>	1,67 t/m <sup>3</sup>

**d. Cantera de roca:** Como cantera de roca se ha previsto utilizar a la caliza que aflora a 4,5 y 5 Km aguas arriba del eje de presa, la misma que empieza a aflorar 3 Km aguas arriba en la ladera izquierda del vaso a manera de lentejones, siendo los más extensos los ubicados en el área señalada aguas arriba de la estancia Ocosuyo (PLANO 1.3).

Para su explotación es necesario el uso de explosivos y, si se aumenta la distancia de transporte, se

concluye que este material es caro; debido a ello su costo es elevado. Para la presa se necesita aproximadamente 200000 m<sup>3</sup> de rip rap, estando este volumen a disposición en la cantera de calizas.

#### **1.5. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO**

El proyecto de Embalse Yuracmayo consiste en la construcción de una presa en el Río Blanco (afluente del río Rímac), a una altitud media de 4300 msnm, donde existen condiciones geomorfológicas favorables. La presa permitirá regular las aguas para fines de una mayor disponibilidad del recurso en las épocas de estiaje y su aprovechamiento en el sistema hidroeléctrico de ELECTROLIMA S.A., así como para el servicio de agua potable de Lima (SEDAPAL).

##### **1.5.1. Tipo de Presa**

(Tomado del Estudio de Factibilidad de la Presa Yuracmayo, Vol. XII Diseño de la presa y obras conexas).

La Presa Yuracmayo es una presa de gravedad de tierra con una altura sobre fundación de 56.0 m, longitud de coronación de 558.5 m y un volumen total de 1.36 MIO m<sup>3</sup> de material morrénico. Las obras conexas de la presa, tales como la galería de descarga de fondo y la excavación de la cámara de compuertas (ya construidas en el lote 1) y vertedero de demasías lateral con descarga en galería, están ubicadas en el estribo derecho de la presa, conformado por rocas volcánicas.



La galería de drenaje (prevista para captar filtraciones) está ubicada en el estribo izquierdo, conformado por material morrénico.

En la fig. 1.2 se puede observar la disposición general de las obras de la presa y en la fig. 1.3 se observa la sección transversal del cuerpo de la presa, y en la fig. 1.4 el perfil longitudinal de la misma, mostrando las diversas zonas que la conforman, entre ellas la pantalla de inyecciones.

La presa constará de dos cuerpos: uno principal que abarca la margen derecha y parte de la margen izquierda, y otro secundario ubicado en el estribo izquierdo (FIG. 1.2).

Las características generales de la presa y obras hidráulicas conexas, así como datos referentes a la cuenca colectora se indican a continuación:

Altura de la presa sobre fundación	56,0 m
Volumen de la presa	1,36 MIO m <sup>3</sup>
Longitud de coronamiento	576,5 m
Cota de coronamiento	4319 msnm
Ancho de la corona	8,0 m
Volumen útil de embalse	43,3 MIO m <sup>3</sup>
Nivel máximo normal de embalse	4315 msnm
Capacidad de aliviadero	51,0 m <sup>3</sup> /s

Longitud de vertedero	15,0 m
Longitud de la descarga en galería de vertedero	178,0 m
Longitud de la galería de descarga/diámetro	500m/2,5 m <sup>2</sup>
Capacidad de la descarga de fondo	27 m <sup>3</sup> /s
Cuenca colectora	98,5 Km <sup>2</sup>
Caudal medio anual (en estiaje)	2,2 m <sup>3</sup> /s
Caudal de la avenida decamilenaria	159 m <sup>3</sup> /s

#### **1.5.2. Características de la Pantalla de Impermeabilización**

La Pantalla de Impermeabilización es paralela al eje de presa pero ubicado 1 m aguas arriba de la misma. Tiene una orientación preferencial de N33.79°E (cuerpo principal) y otra de N19.75°E (cuerpo secundario). Esta última, por razones técnicas y económicas, no se llegó a construir, siendo reemplazada por una alfombra impermeable.

La pantalla de inyecciones tiene una longitud de 282 m de longitud (FIG. 1.5), la cual va desde la progresiva 122 hasta la 404. Los trabajos en la pantalla de inyecciones, en superficie, se pueden dividir en cinco zonas, que se describen a continuación: ^

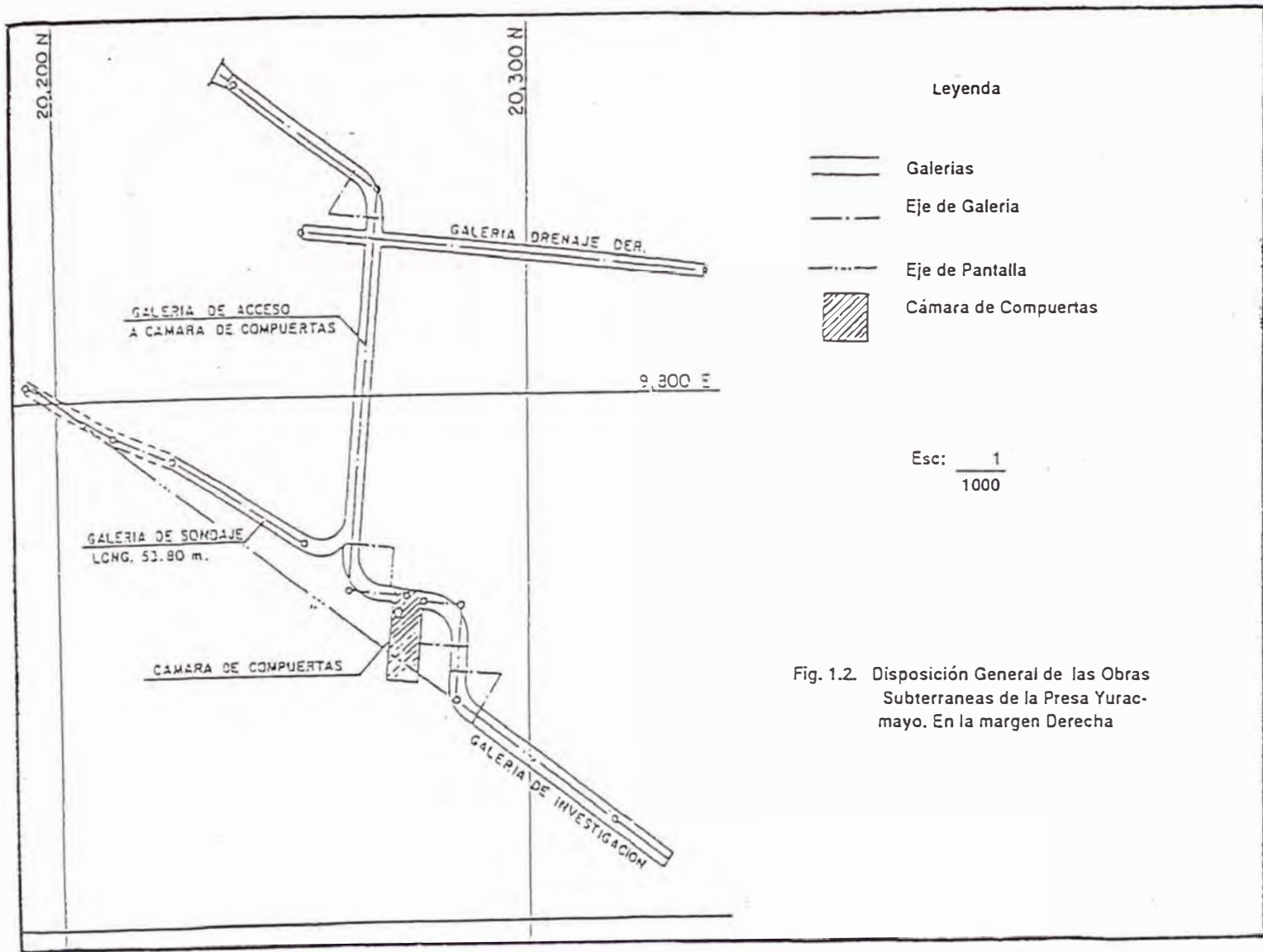
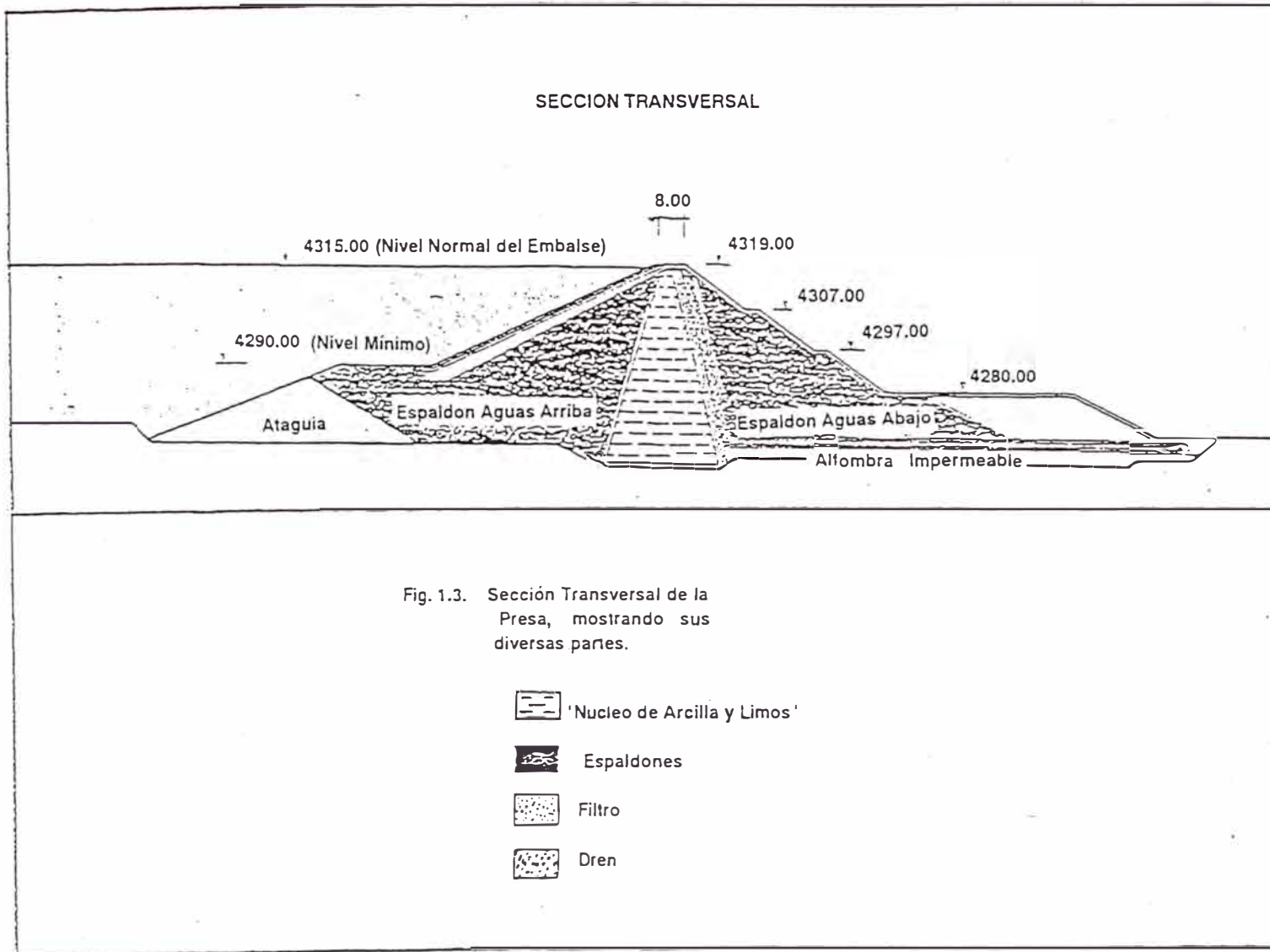


Fig. 1.2. Disposición General de las Obras Subterráneas de la Presa Yuracmayo. En la margen Derecha



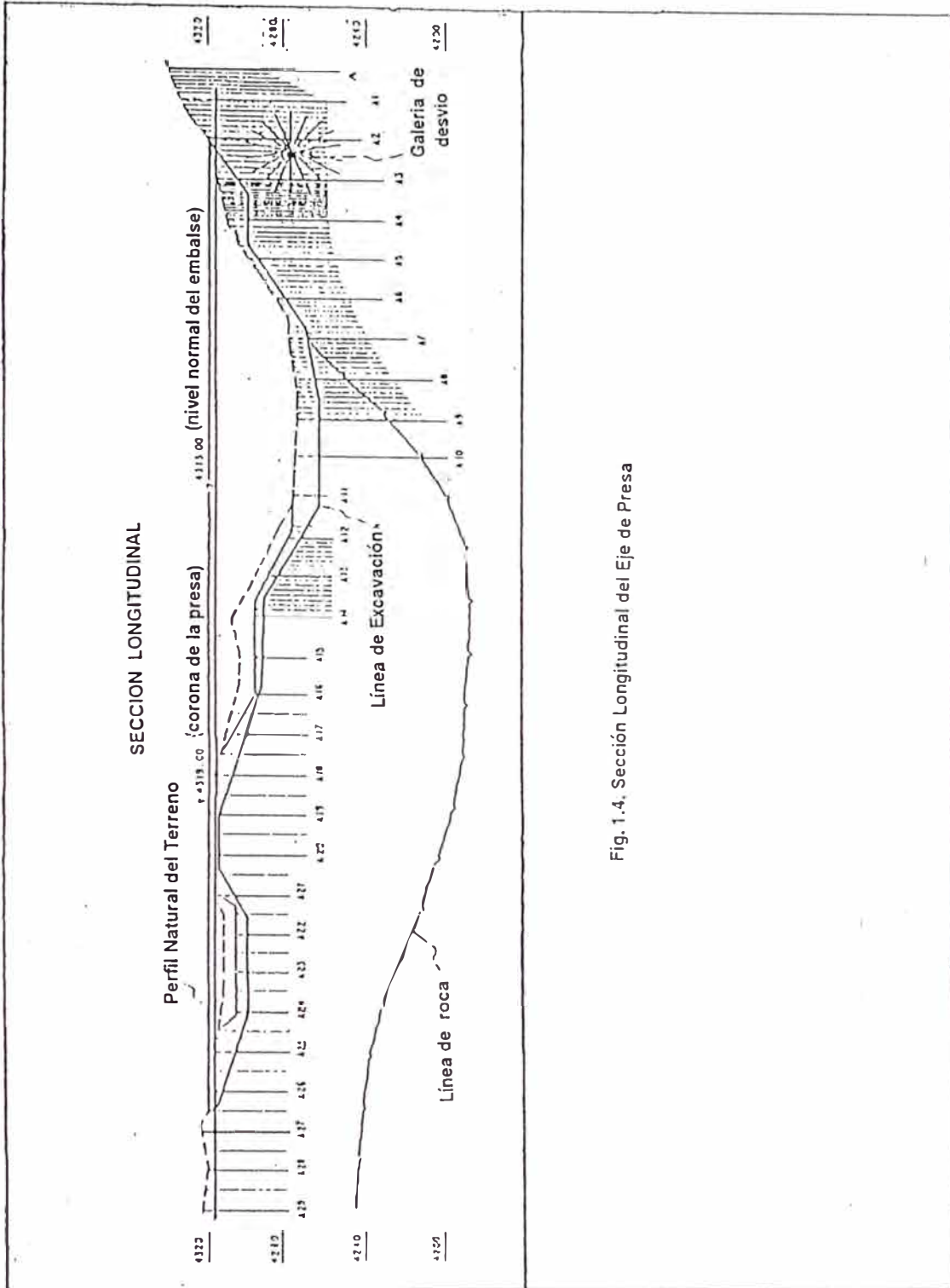


Fig. 1.4. Sección Longitudinal del Eje de Presa

- *Tramo A + 122 a A + 168,5*: En este tramo existe una sólo fila de inyecciones, siendo de impermeabilización. Los taladros cortaron varias secuencias de depósitos cuaternarios hasta llegar a la roca; es debido a ello que sólo se ha inyectado esta última, teniéndose un tramo libre, variable según la profundidad a la cual se halla la roca. La profundidad máxima perforada en este tramo es de 90 m y la mínima de 25 m. Las perforaciones están separadas 1,5 m una de otra.

*Tramo A + 170 a A + 215*: Se han perforado tres hileras de agujeros, todos de impermeabilización; la central está a 1,5 m de las otras dos. Las perforaciones tienen una disposición de tres bolillos y entre agujero y agujero, en una misma fila; están separadas 1,5 m. Sus profundidades oscilan entre 83 y 67 m para la fila central, mientras que para las laterales ésta va de 53 a 24 m. La denominación para la fila central es  $A + x$  (donde  $x$  es el valor de la progresiva), y para las laterales es  $Cu$  y  $Cd$  que corresponden a la hilera aguas arriba y aguas abajo respectivamente del eje de pantalla ( $A +$ ).

- *Tramo A + 216,5 a A + 290*: Aquí se tienen dos tipos de inyecciones: de impermeabilización y de consolidación. Las perforaciones para las inyecciones de impermeabilización se ubican en la fila central ( $A +$ ), mientras que las de consolidación se les halla aguas arriba y aguas abajo, siendo cinco filas en

ambos casos. Las denominaciones, profundidad de los taladros y longitud de la fila de perforaciones de este último tipo de inyecciones es variable, con la característica que la profundidad y longitud de la fila disminuye a medida que se aleja de la pantalla de impermeabilización.

Como se aprecia en la fig. 1.5, las filas están separadas 1,5 m una con respecto a otra. Las denominaciones y profundidades máxima y mínima son:

Fila	Prof. Máxima	Prof. Mínima
Eu	19,45	12,40
Elu	17,25	9,85
Fu	17,30	9,70
Gu	15,15	9,75
Hu	15,70	11,70
Ed	26,45	12,80
Eld	17,25	8,50
Fd	16,95	8,45
Gd	14,65	5,50
Hd	14,50	11,90

La profundidad máxima alcanzada en la pantalla de impermeabilización es 76,5 m y la mínima 38 m.

*Tramo A + 291,5 a A + 362:* En este tramo se hallan tres filas de inyección: la central (A +) es de impermeabilización y las laterales (Eu y Ed) son de consolidación. Como en los casos anteriores los taladros, en una misma fila, están separados 1,5 m y las filas se hallan 1,5 m una de otra. Las profundidades son:

Fila	Prof. Máxima	Prof. Mínima
As	80,00	28,00
Eu	19,30	13,60
Ed	23,50	7,00

- *Tramo A + 363,5 a A + 404:* En estas progresivas se halla una sólo fila de inyecciones en la cual los taladros se hallan separados 1,5 m uno de otro. La profundidad máxima es de 76 m y la mínima de 66 m.

Parte de la pantalla se ha construido desde una galería llamada *galería de investigación* cuyas características se describen en el siguiente capítulo.



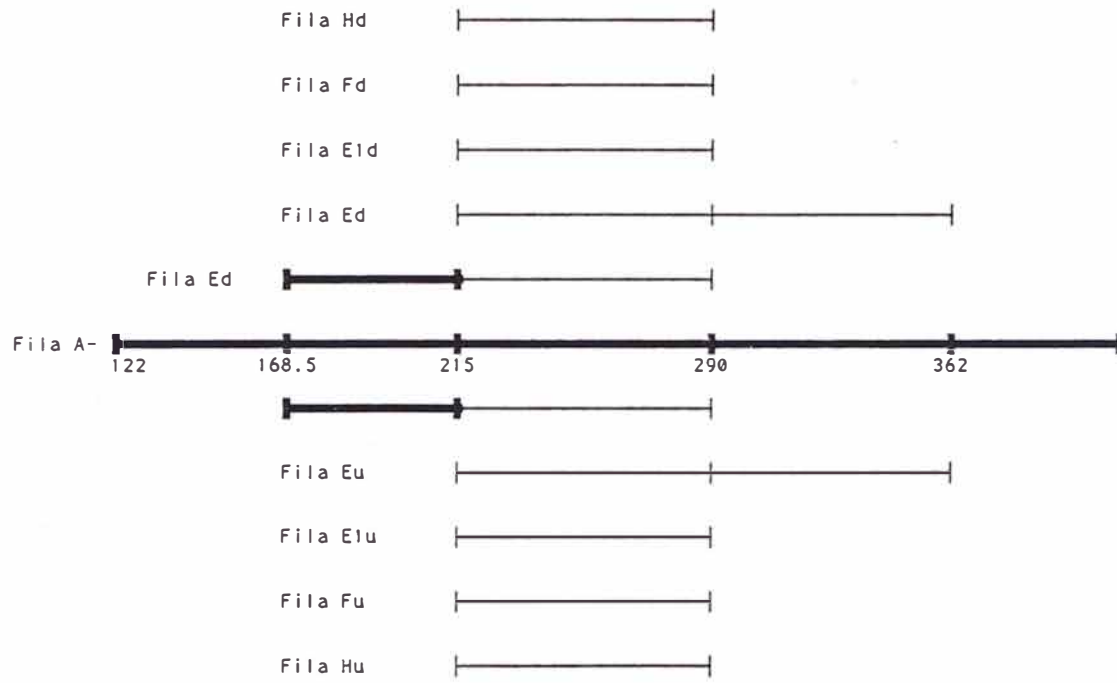


FIG. 1.5 DISPOSICION DE LAS FILAS DE INYECCION DE LA PANTALLA DE INYECCIONES

 IMPER.  
 CONSOL.

## 2. PARAMETROS, ESTUDIOS Y CONCEPTOS TEORICOS PARA LA UBICACION Y DISEÑO DE UNA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION

### 2.1. CONSIDERACIONES GENERALES DE INYECCION

Todo estudio de inyección del basamento y estribos de una presa debe iniciarse definiendo parámetros del macizo rocoso y de los suelos sobre los que se cimentará, para lo cual se deben hacer diferentes tipos de investigación, especialmente en las perforaciones de investigación in situ, las cuales nos determinan el tipo de rocas, RQD, características geomecánicas y permeabilidad. Por otra parte se deben realizar pruebas de laboratorio en las cuales se determinen tiempo de fragua, sedimentación, fluidez marsh, etc., de las probables mezclas a inyectar. Escogidas las mezclas, y el tipo de inyección los procedimientos constructivos como el equipo a utilizar, la presiones a diferentes profundidades y otros, en base a las características ya mencionadas del suelo o roca de cimiento, se procede a la inyección en el campo en un tramo llamado *tramo de*

*prueba*, el mismo que deberá ser verificado, al terminarse la inyección, con perforaciones llamadas de control, de las cuales se obtienen testigos y realizan ensayos de permeabilidad cada 3 m de profundidad. Estos datos servirán de base para decidir si las mezclas y el tipo de inyección escogidos son los correctos; en caso de no obtenerse los resultados esperados se procederá a cambiar de mezclas y tipo de inyección, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito.

#### **2.1.1. Investigaciones preliminares**

El presente item trata de los trabajos que se deben realizar antes de elegir un tipo y método de inyección, siendo estos estudios los primeros y más importantes, por lo que se deben llevar a cabo con mucho cuidado y exactitud.

**a. Investigaciones Geognósticas:** Estas se efectúan en sondeos hechos con máquinas perforadoras, el mismo que tiene un procedimiento determinado; para mayor información ver Cambefort H., (1969), *Perforaciones y sondeos*. El primer ensayo en realizarse es el llamado *Ensayos Lugeon* o *Lefranc*, según sea el caso. Cabe mencionar que los sondeos son con recuperación de muestras, las cuales serán llevadas a gabinete para su estudio.

**a.1. Ensayos de permeabilidad:** Son ensayos que se realizan para determinar la permeabilidad del terreno cada cierto tramo, por lo que se

ejecutan en los sondeos de perforación. Existen dos tipos de ensayos: *Lefranc* y *Lugeon*; ambos tienen el mismo principio, que es el de inyectar agua en el terreno a través de un tramo conocido.

**a.1.1. Ensayos tipo Lefranc:** Se realizan en terrenos no consolidados (suelos), en los cuales las paredes siempre se entuban, no necesitando lodos de perforación, excepto si el terreno no es lo suficientemente consolidado, como ocurre en la margen izquierda. Este ensayo se puede realizar mediante dos métodos:

- A carga constante
- A carga variable

En el primer caso se utiliza caudalímetro si el volumen que se infiltra es mayor de 2 lt/min, en caso contrario se usará probeta (*Ramírez J., 1992*).

En carga variable se mide el descenso del nivel en cm/min. Se aplica cuando el descenso del agua es del orden de los milímetros o centímetros por minuto.

#### **METODOLOGIA DEL ENSAYO**

Se perfora el terreno a una determinada profundidad, luego se baja el casing

hasta que la distancia que lo separe del bulbo (tramo de ensayo) no sea mayor de 30 cm. Se saca la tubería de perforación, quedando expedito el tramo de prueba. (FIG. 2.1).

Se coloca un caudalímetro manteniendo un nivel constante, midiendo el caudal que pasa en un minuto, para el caso de carga constante. Para carga variable se mide la distancia que baja el nivel cada uno, dos, tres, etc. minutos, según la distancia que baje (FIG. 2.2)

#### **EQUIPO UTILIZADO**

- Para los ensayos de carga constante se usa caudalímetro, bomba de agua, estabilizador y cronómetro.
- En los ensayos de carga variable se utiliza flexómetro y cronómetro.ã

#### **CALCULO**

He creído conveniente realizar un ejemplo tanto para carga constante como para carga variable, ellos se observan a continuación. Se debe tener en cuenta que el formato se tienen las fórmulas para cada tipo de ensayo por lo que no se necesita de una mayor explicación.

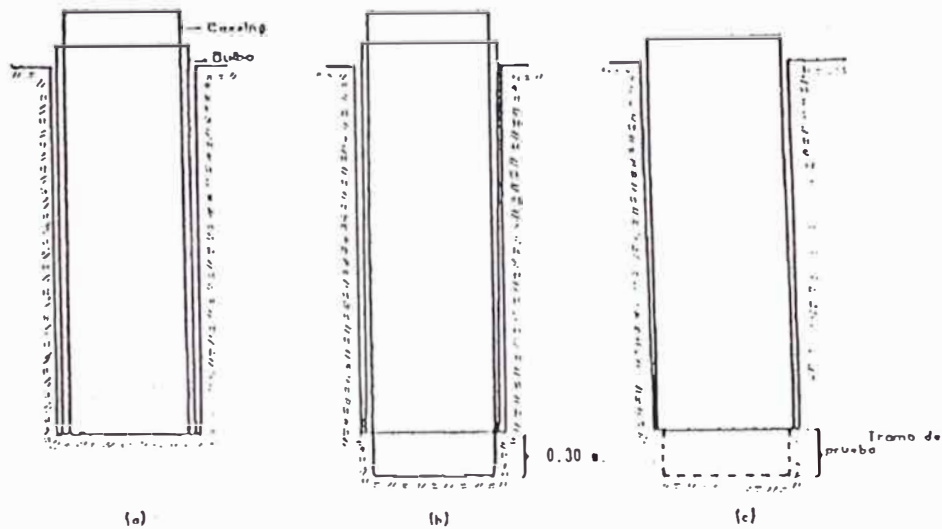


Fig. 2.1. Pasos que se siguen para el tramo de prueba.

- a) Se perfora hasta el nivel del Bulbo.
- b) Se perfora hasta que la distancia entre el casing y el bulbo sea de 30 cm.
- c) Se saca el Casing quedando listo el tramo de prueba

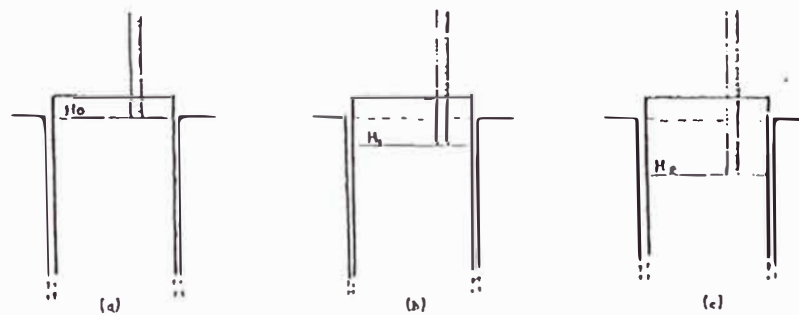


Fig. 2.2. Metodología del Ensayo Lefranc a carga variable.

- a) Nivel Inicial del agua ( $H_0$ ).
- b) Luego de un minuto se mide la altura ( $H_1$ ) que ha bajado el nivel de agua.
- c) Se mide el nivel del agua cada minuto durante diez minutos ( $H_2$ ).

**PROYECTO YURACMAYO  
CONSORCIO  
ENERGOPROJEKT - GUICONSA**

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN PERFORACION (LEFRANC)**

Método por Absorción de Agua en Materiales Suelos

ENSAYO EJECUTADO ENTRE PROFUNDIDAD		10.70 - 11.00 m	SONDEO N° 61/114
EL DIA 15-01-92 DE 8:00 A 6:00		hora, en PLORENA	ENSAYO N° 02

ORIGEN DE COTAS

- a = Altura sobre el N.T.
- ha = Profundidad Nivel Natural de Agua
- C = Longitud Total del Investimiento
- L = Profundidad del Sonda
- d = Diámetro del Investimiento
- e = Diámetro Bulbo de Ensayo
- l = Longitud del Bulbo
- Después del Ensayo
- Ah0 = Sobrecarga Hidráulica Inicial
- hi = Profundidad del Agua en el Tubo de Investimiento
- Ah1-Ah0 = Sobrecarga Hidráulica en Tiempo
- hn = Lectura acumulada descenso agua (gasto en m)
- dln = Lectura parcial gasto (m)

	0.00 m
	5.60 m
	10.70 m
	11.00 m
	11.93 cm
	9.53 cm
	30.00 cm
	1070.00 cm
	7.73

TIPO DE ENSAYO: CARGA VARIABLE				REPRESENTACION GRAFICA			
t (min)	Q (l/s)	ΔQ (l/m²)	Δh (cm)	t (min)	hn (m)	d ln (m)	Δ h (cm)
0	660.0	—					
1	572.0	12.0					
2	682.0	10.0					
3	692.0	9.5					
4	501.5	9.5					
5	510.0	6.5					
6	518.5	6.5					
7	526.5	6.0					
8	534.0	7.5					
9	542.0	8.0					
10	549.5	7.5					
11	557.0	7.5					
12	564.5	7.5					
13	572.0	7.5					
14	579.0	7.0					
15	586.0	7.0					
16	593.0	7.0					

Nivel Variable  $\Delta h = \frac{\Delta h_p + \Delta h_n}{2}$  cm

Nivel Constante  $\Delta h = \Delta h_0$  cm

$l_p - l_n$  — min

$l_p - l_n$  — cm

<p><b>CALCULO DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD</b></p> <p><b>CALCULO DEL CAUDAL Q</b></p> <p>Nivel Variable <math>Q = \frac{\pi d^2}{4 \times 60} \times \frac{(l_p - h_n)}{(l_p - l_n)}</math> cm³/seg</p> <p>Nivel Constante <math>Q = 124.166</math> cm³/seg</p>	<p><b>CALCULO DE K</b></p> <p>con <math>l / e = 0</math> <math>K = Q / (\Delta h_0 \pi)</math></p> <p>con <math>l / e \leq 2</math> <math>K = Q / (\Delta h_0 \pi \sqrt{1 + (l/e)^2})</math></p> <p>con <math>l / e &gt; 2</math> <math>K = Q \ln \frac{(2l)}{e} / \pi \Delta h_0</math></p> <p>K nivel variable <math>1.13 \times 10^{-3}</math> cm/seg</p> <p>K nivel constante <math>1.13 \times 10^{-3}</math> cm/seg</p>
---	---

\_\_\_\_\_  
EJECUTADO POR

\_\_\_\_\_  
V° B° SUPERVISOR

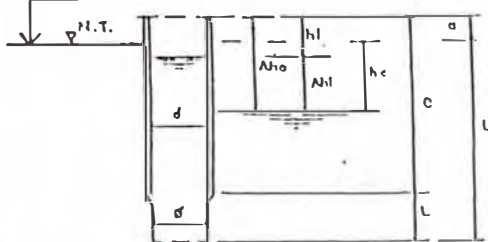
**PROYECTO YURACMAYO  
CONSORCIO  
ENERGOPROJEKT - GUICONSA**

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN PERFORACION (LEFRANC)**

Método por Absorción de Agua en Materiales Suelos

ENSAYO EJECUTADO ENTRE PROFUNDIDAD	<u>37.67 - 38.00</u> m	SONDEO N°	<u>1.11</u>
EL DIA <u>30-10-11</u> DE <u>23:00</u> A <u>23:10</u> horas, en <u>Lima - Perú</u>		ENSAYO N°	<u>09</u>

ORIGEN DE COTAS

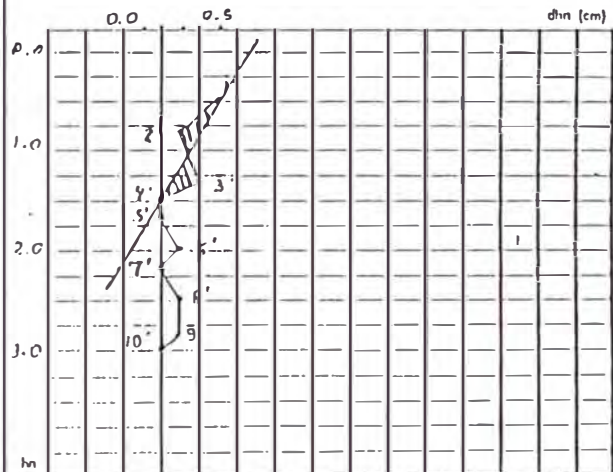


a = Altura sobre el N.T.	<u>0.65</u>	m
ha = Profundidad Nivel Natural de Agua	<u>0.50</u>	m
C = Longitud Total del Pavestimiento	<u>37.67</u>	m
L = Profundidad del Sonda	<u>38.00</u>	m
d = Diámetro Int. Pavestimiento	<u>10.12</u>	cm
o = Diámetro Bulbo de Ensayo	<u>9.80</u>	cm
L = Longitud del Bulbo		cm
Después del Ensayo	<u>13.00</u>	cm
Δho = Sobrecarga Hidráulica Inicial	<u>115.00</u>	cm
hi = Profundidad del Agua en el Tubo de Pavestimiento		cm
Δhi-Δho hi = Sobrecarga Hidráulica en Tiempo		cm
hn = Lectura acumulada descenso agua (gasto en m)	<u>0.03</u>	cm
dhn = Lectura parcial gasto (m)		

TIPO DE ENSAYO: CARGA VARIABLE

REPRESENTACION GRAFICA

l (mln)	hn (m)	d hn (m)	Δ h (cm)	l (mln)	hn (m)	d hn (m)	Δ h (cm)
0	0.00	--	115.00				
1	0.50	0.50					
2	0.80	0.30					
3	1.30	0.50					
4	1.50	0.20	113.50				
5	1.70	0.20					
6	2.00	0.30					
7	2.20	0.20					
8	2.50	0.30					
9	2.80	0.30					
10	3.00	0.20	112.00				



Nivel Variable	$\Delta h = \frac{\Delta h_p + \Delta h_n}{2}$	<u>114.00</u> cm	$l_p - l_n$	<u>3.0</u> mln
Nivel Constante	$\Delta h = \Delta h_o$	— cm	$h_p - h_n$	<u>1.0</u> cm

CALCULO DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

CALCULO DEL CAUDAL Q

Nivel Variable	Q = $\frac{\pi d^2}{4 \times 60} \times \frac{(l_p - l_n)}{(l_p - l_n)}$	= <u>0.8408</u> cm <sup>3</sup> /seg
Nivel Constante	Q = _____	cm <sup>3</sup> /seg

CALCULO DE K

con $l / o < 0$	K = $Q / (\Delta h \pi r)$
con $l / o \leq 2$	K = $Q / (\Delta h \pi 2r \sqrt{l^2 + r^2})$
con $l / o > 2$	K = $Q L_n \left( \frac{2.25}{o} \right) / 2 \pi r h L$
K nivel variable	<u>5.620 x 10<sup>-5</sup></u> cm/seg
K nivel constante	— cm/seg

EJECUTADO POR \_\_\_\_\_

V° B° SUPERVISOR \_\_\_\_\_



**a.1.2. Ensayos tipo Lugeon:** Estos ensayos son análogos a los ensayos Lefranc. Al igual que éstos, se ejecutan mientras avanza la perforación. Se realizan en rocas de baja permeabilidad,  $K \dot{Y} <10^{-3}$  a  $10^{-5}>$ , más o menos fisurada, es decir en una roca cuyo RQD sea medio a alto.

#### METODOLOGIA DEL ENSAYO

Para preparar el tramo de prueba se perfora hasta una cierta profundidad, a partir de ella se perfora 3 ó 5 m, según las especificaciones. Luego se fija un obturador en la parte superior de este tramo, inyectándose agua a presión (FIG. 2.3). Esta inyección se efectúa en estadios de presión, generalmente 5 estadios, siendo sus valores en función de la profundidad del sondeo, tomando lecturas del caudalímetro cada minuto, durante el primer estadio hasta que el caudal que se inyecte sea constante durante diez minutos.

Se sube la presión al estadio siguiente (intermedio) con las mismas consideraciones, luego se toman medidas para la máxima presión y finalmente se

decrece a los 2 siguientes estadios. Los resultados obtenidos son llevados al gabinete para sus cálculos.

Se pueden realizar pruebas con doble obturador en aquellos casos en los cuales se quieren comprobar la permeabilidad de un tramo. Es muy importante definir el comportamiento de las fracturas y el relleno de las mismas de acuerdo a las curvas que se obtendrán de presión efectiva vs. consumo de agua, así como las características litológicas del tramo a ensayar; por ejemplo, una fractura abierta en roca muy competente puede tener la misma permeabilidad que una roca muy fracturada.

#### **EQUIPO UTILIZADO**

- Obturador simple de 60 cm. (Packer) con tubo perforado
- Manómetro
- Caudalímetro
- Estabilizador de agua o cilindro de expansión
- Bomba de agua

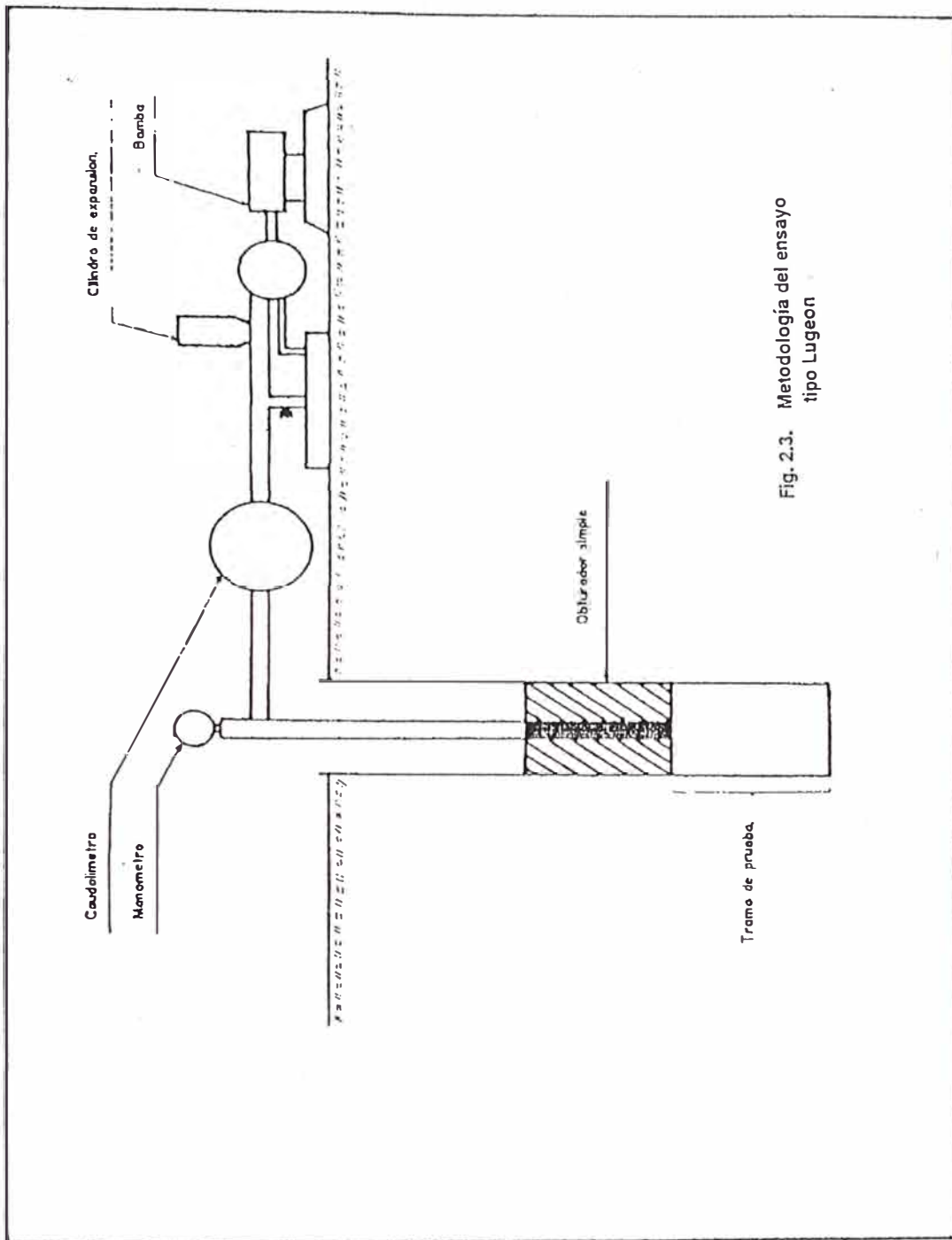


Fig. 2.3. Metodología del ensayo tipo Lugeon

- Mediadores del nivel del agua (sonda eléctrica)

### CALCULOS

Una vez tomados los datos en el campo estos se llevan al gabinete para su procesamiento, tal como se observa en la hoja adjunta. Para determinar  $Q$  (l/m/min), al caudal promedio ( $q$ ) se le divide entre el tramo de prueba. La pérdida de carga se halla mediante un abaco (se adjunta como ejemplo) el cual varía según la distancia de la tubería y el caudal. Este abaco es diferente para otros diámetros de tubería. Con estos datos se determina la presión efectiva (PEF). Para convertir esta PEF en unidades lugeón se aplica la siguiente fórmula:

$$UL = \frac{PEF}{10}$$

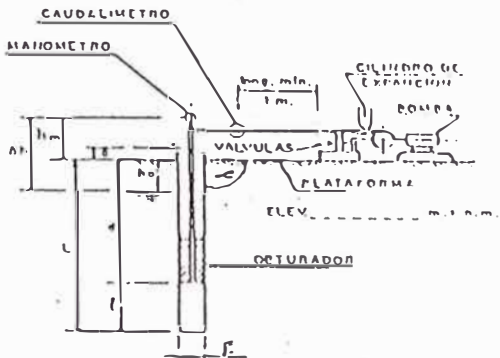
PEF

A continuación se realiza unigráfico de PEF Vs  $Q$ , este gráfico junto con los patrones de Houlby, que también se adjunta, se escoge el lugeon adecuado



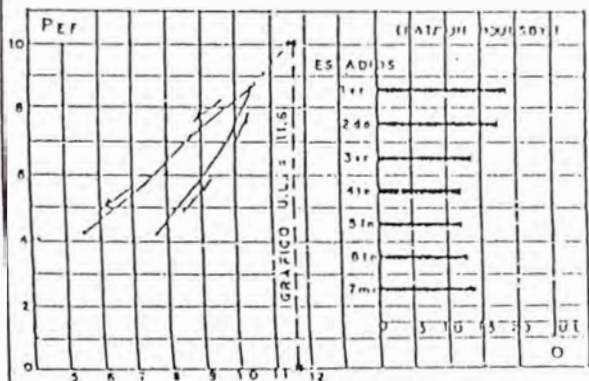
REGISTRO DE PERDIDA DE AGUA A PRESION LUGEO

ENSAYO EJECUTADO ENTRE PROFUNDIDAD 25.00 y 30.04 m. SONDEO Nº CHY-11-5J  
 EL DIA 06/06/90 DE 10:36 A 12:00 HORAS, EN ENSAYO Nº 01



- h<sub>m</sub> = ALTURA DEL MANOMETRO 1.29 m.
- o = ALTURA SOBRE N.T. 0.10 m.
- h<sub>0</sub> = PROF. NIVEL NATURAL DE AGUA 15.74 m.
- Δh = SOBRECARGA HIDRAULICA 17.03 m.
- d = PROFUNDIDAD DEL ORTURADOR 25.00 m.
- L = PROFUNDIDAD DE PERFORACION 30.04 m.
- α = INCLINACION CVERTICAL 0.00 °
- l = LONGITUD TRAMO DE ENSAYO 5.04 m.
- φ = DIAMETRO DEL BULBO DE ENSAYO 9.80 cm.
- P<sub>M</sub> = PRESION MANOMETRICA
- P<sub>EF</sub> = PRESION EFECTIVA EN EL PUNTO MEDIO DEL TRAMO DEL ENSAYO.
- ΔP = PERDIDAS DE CARGA
- q = VOLUMEN DE AGUA EN LITROS POR UNIDAD CUADRADA DE TRAMO.
- C = CAUDAL EN LITROS POR METRO DE TRAMO DE ENSAYO POR MIN.

TIEMPO EN MINUTOS	P <sub>M</sub> = 2.5		P <sub>M</sub> = 4.0		P <sub>M</sub> = 5.5		P <sub>M</sub> = 7.0		P <sub>M</sub> = 5.5	
	LECTURA CAUDALIMET.	q (l) EN 1 min.	LECTURA CAUDALIMET.	q (l) EN 1 min.	LECTURA CAUDALIMET.	q (l) EN 1 min.	LECTURA CAUDALIMET.	q (l) EN 1 min.	LECTURA CAUDALIMET.	q (l) EN 1 min.
1 = 0'	3655.0	40.0	4280.0	47.0	4920.0	52.0	5640.0	54.0	6360.0	44.0
1 = 1	3695.0	40.0	4327.0	46.0	4972.0	50.0	5694.0	52.0	6404.0	44.0
1 = 2	3735.0	41.0	4373.0	47.0	5022.0	52.0	5746.0	51.0	6448.0	43.0
1 = 3	3776.0	39.0	4420.0	49.0	5074.0	49.0	5799.0	51.0	6491.5	43.5
1 = 4	3815.0	40.0	4464.0	46.0	5123.0	50.5	5852.0	52.0	6535.0	44.0
1 = 5	3855.0	39.0	4510.0	44.0	5173.0	49.0	5904.0	52.5	6579.0	42.5
1 = 6	3894.0	39.0	4554.0	45.0	5222.0	49.0	5956.5	52.5	6621.5	43.5
1 = 7	3933.0	40.0	4599.0	44.0	5273.0	49.0	6009.0	52.0	6665.0	43.0
1 = 8	3973.0	38.0	4643.0	45.5	5322.0	50.0	6061.0	53.0	6708.0	43.0
1 = 9	4011.0	39.0	4688.5	44.5	5372.0	49.0	6114.0	52.0	6751.0	43.0
1 = 10	4050.0		4733.0		5421.0		6166.0		6794.0	
Q (l/m/mln)	= 7.837		= 0.906		= 9.940		= 10.436		= 8.611	
P <sub>M</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	= 2.500		= 4.000		= 5.500		= 7.000		= 5.500	
ΔP (kg/cm <sup>2</sup> )	= 0.003		= 0.004		= 0.005		= 0.005		= 0.002	
Δh/10(kg/cm <sup>2</sup> )	= 1.703		= 1.703		= 1.703		= 1.703		= 1.703	
P <sub>EF</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	= 4.200		= 5.690		= 7.190		= 8.690		= 7.201	



$P_{EF} = P_M - \Delta P + \Delta h / 10 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

LUGEOH = PROYECTADO 12.00 U.L./m/mln. a 10 kg/cm

OBSERVACIONES:  $K = 1.69 \times 10^{-4} \text{ cm/seg.}$

Según HOULSBY = (Flujo Turbulento)

U.L. = 11.96 l/m/min a 10 kg/cm<sup>2</sup>.

F.A. MOSTACERO  
EJECUTADO POR:

Vo. Bo. SUPERVISOR

# ENSAYO DE PERDIDA DE CARGA

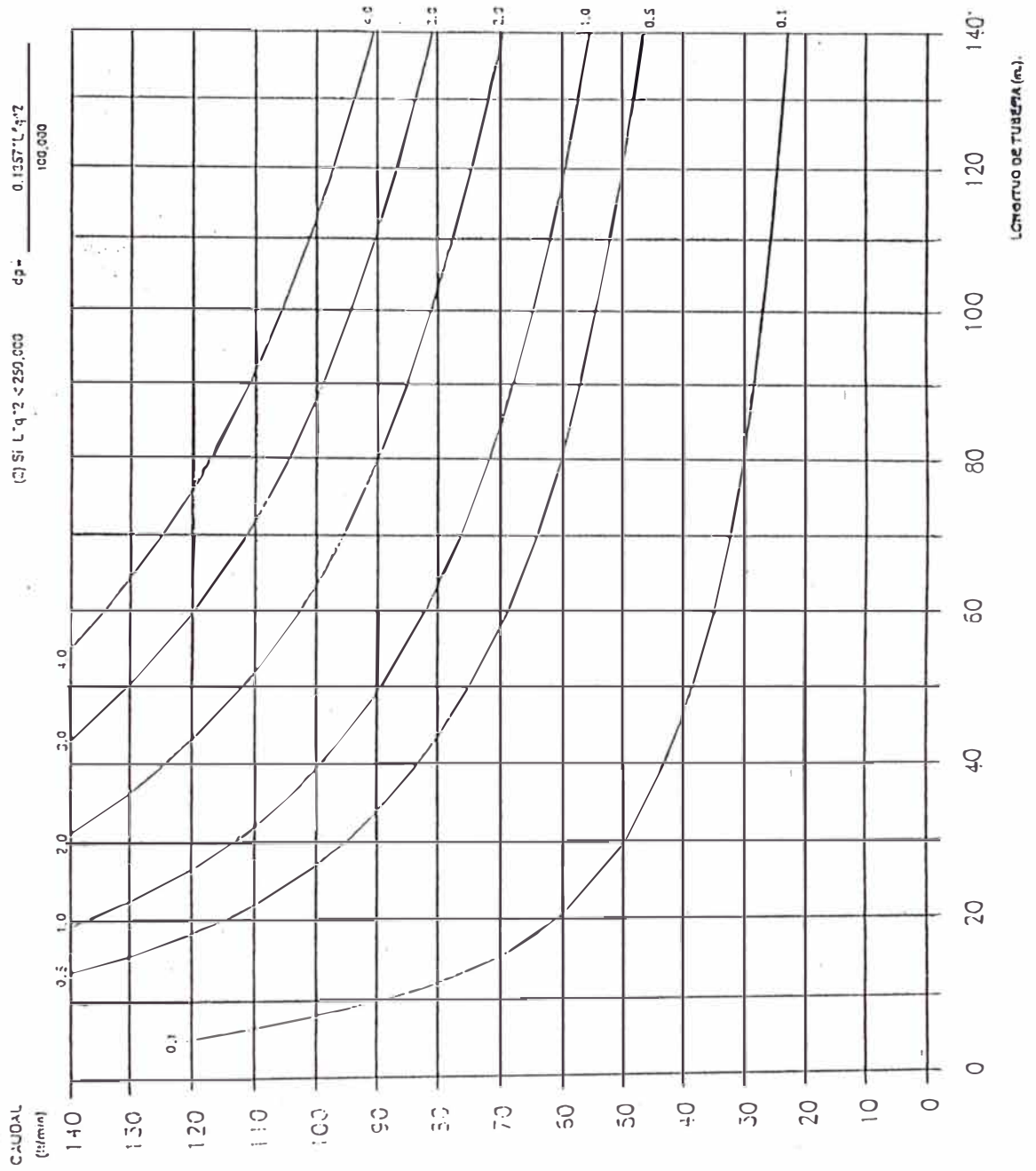
TUBERÍA AW

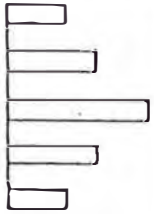
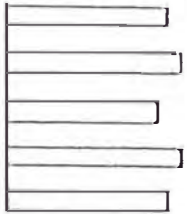
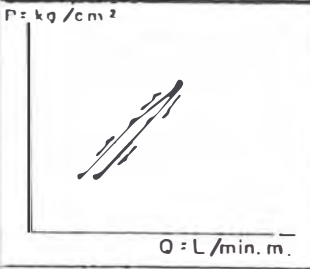
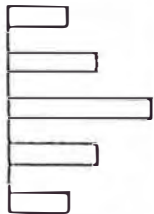
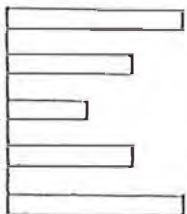
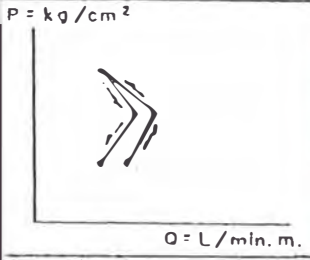
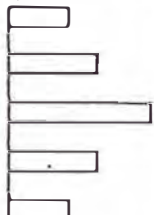
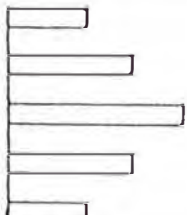
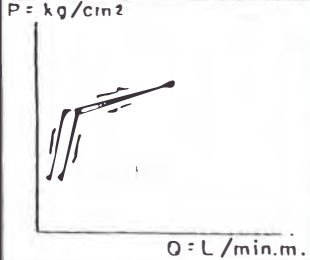
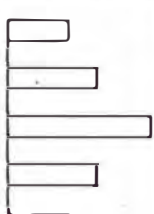
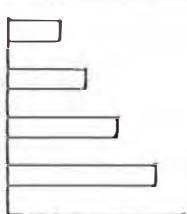
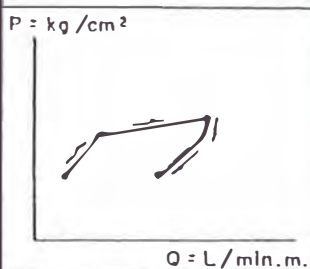
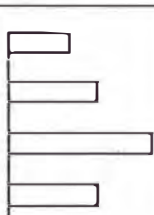
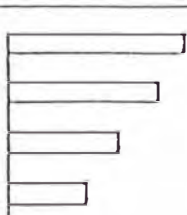
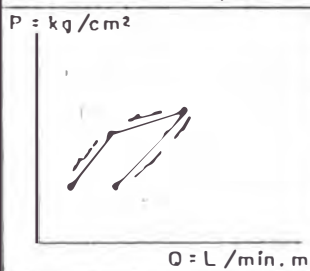
Emulsiones: (1) Si  $L \cdot q^2 > 250,000$   $dp = 0.2926 \cdot L \cdot q^2 \cdot 15$   $- 0.5647$

100,000

(2) Si  $L \cdot q^2 < 250,000$   $dp = 0.1357 \cdot L \cdot q^2$

100,000



TIPO DE FLUJO	ESTADIOS 10' c/u	PRESIONES DE PRUEBA MAX. RELATIVA (APROX)	PATRONES LUGEON CALCULADOS (MRA CADA 10" PATRON GENERALIZADO)	CARACTERISTICAS DE LOS PATRONES E INTERPRETACION	VALOR A USAR COMO "K" DEL ENSAYO	CURVA DE INTERPRETACION
FLUJO LAMINAR	1º 2º 3º 4º 5º			LOS 5 VALORES LUGEON SON APROXIMADAMENTE IGUALES.	SE USA EL PROMEDIO DE LOS 5 VALORES.	
FLUJO TURBULENTO	1º 2º 3º 4º 5º			EL VALOR LUGEON MAS BAJO OCURRE EN LA PRESION MAX	SE USA EL VALOR LUGEON PARA LA PRESION MAXIMA.	
FLUJO DILATACION	1º 2º 3º 4º 5º			EL VALOR LUGEON MAS ALTO OCURRE EN LA PRESION MAX	SE USA LOS VALORES LUGEON PARA LAS PRESIONES MINIMAS y/o MEDIAS.	
FLUJO EROSION	1º 2º 3º 4º 5º			LOS VALORES LUGEON AUMENTAN EN EL PROCESO DE LA PRUEBA. (POR CAMBIOS EN EL MEDIO ROCOSO.	SE USA EL VALOR LUGEON MAS ALTO.	
FLUJO RELLENO	1º 2º 3º 4º 5º			LOS LUGEONES DECRECEN EN EL PROCESO DE LA PRUEBA (LOS VACIOS SON GRADUALMENTE RELLENADOS.)	SE USA EL VALOR LUGEON MAS BAJO.	

CLASIFICACION DEL VALOR LUGEON REPRESENTATIVO

- 0 - 1 U.L. - MUY FAVORABLE  
 1 - 3 U.L. - FAVORABLE  
 3 - 10 U.L. - DESFAVORABLE  
 > 10 U.L. - MUY DESFAVORABLE

PATRONES TIPOS DE RESULTADOS DE PRUEBAS LUGEON  
(HOULSBY 1976)

Estos dos ensayos nos ayudan a determinar la programación de la inyección, y, sin aplicación posterior a la inyección de la primera cortina, nos proporcionan datos que nos permitan deducir si se debe realizar un nuevo programa de inyección, de acuerdo a los resultados obtenidos de la primera.

Para Lugeon menores de 4 y Lefranc del orden de los  $10^{-6}$ , el terreno inyectado se puede considerar lo suficientemente impermeable.

**a.2. Estudio de los testigos de perforación:** Es un resumen de la descripción geológica de la roca o suelo que se ha obtenido de la perforación. Es muy importante porque ofrece información del tipo de material sobre el que se va a inyectar, a la vez que define la ubicación exacta de los  $\beta\delta$  contactos litológicos.

**a.2.1. Características consideradas durante el logeo:** Cuando se describe la roca se deben tener en cuenta las siguientes características :

- Datos generales del sondeo: se ubican en la parte superior del registro, tales como proyecto, objetivo, ubicación, coordenadas, cota, angulo con la vertical, azimut (si el pozo es



inclinado), profundidad ejecutada y proyectada, etc.

Datos de operación: estos son tipo de revestimiento y  $\varnothing$  perforación usados, longitud de las corridas, control de agua de la perforación, nivel del agua natural, color de agua de perforación.

- Datos del macizo: Se debe considerar la litología, color, tamaño de grano, grado de alteración, dureza, fractura y exfoliación; así como su permeabilidad.

Datos del testigo: En este ítem se consideran los siguientes parámetros:

- \* Longitud de la corrida

- \* Longitud recuperada

- \* N° de trozos mayores e iguales a 10 cm, en la corrida para cálculo de RQD.

- \* Porcentaje de recuperación:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Longitud recuperada}}{\text{Longitud de corrida}}$$

$$RQD = \frac{\text{Longitud de trozos mayores de 10cm}}{\text{Longitud de corrida}}$$

Para luego en suelo se debe considerar los puntos arriba descritos, excepto del RQD. Además se debe tener en cuenta los criterios del cuadro 2.1 adjunto.

Además del cuadro 2.1, es importante determinar el tipo de material según los sistemas de clasificación de suelos SUCS o ASHTO (ANEXO).

**b. Ensayos de Laboratorio:** Los ensayos de laboratorio cumplen un papel importante dentro de una inyección, debiendo tomarse los resultados con bastante cuidado, no siendo determinantes en una inyección, eso debido a que no se pueden reproducir en el laboratorio las mismas condiciones del terreno a inyectar, particularmente su comprensibilidad.

Los principales trabajos que se realizan en el laboratorio son:

**b.1. Pruebas preliminares:** Se realizan para elegir el punto de inyectabilidad máxima. Con los resultados que se obtienen se eligen mezclas, que luego se les someterá a otras pruebas. Estas pruebas preliminares son

**b.1.1. Inicio de fragua:** También es llamado *inicio de pega*. Es el tiempo que demora un mortero para que comience a consolidar. Para saber, el instante en que una mezcla comienza a fraguar se usa

TAMAÑO DE LOS MATERIALES MM	FORMA	ANGULOSIDAD	SUPERFICIE	PETROGRAFIA	GRANULOMETRIA	TAMAÑO	% DE FIÑOS			PLASTICIDAD	COMPACTAC.	
							EN POCA PROPORCION	EN PROPORCION DOMINANTE				
								COLOR	OLOR			CONSISTENC.
BLOQUES > 300	.EQUIDIMENCIONAL . PLANAR . ELONGADO	. ANGULOSO . SUBANGULOSO	. RUGOSO	. MONOGENICO (INDICAR EL TIPO)								
CANTOS 300-76	. ACICULAR . IRREGULAR	. SUBREDONDEADO . REDONDEADO	. LIZO	. POLIGENICO (INDICAR LOS TIPOS DOMINANTES EN PORCENTAJES)								
GRAVA 76 - 2					.BIEN GRADUADA (TODAS LAS GRANULOMETRIAS ESTAN REPRESENTADAS) .MAL GRADUADO (FALTA O ESTAN MAL REPRESENTADOS ALGUNAS CLASES DE GRANULOMETRIA)	.GRUESA (76-19MM) .FINA (19-2 MM)						
ARENA .2-0.014				CUANDO ES POSIBLE SE DESCRIBE LA PETROGRAFIA O MINERALOGIA	.UNIFORME(TIENE SOLO UNA CLASE DE GRANULOMETRIA REPRESENTADA)	. GRUESA . MEDIA . FINA						
LIMOS 0.074-0.002							DEFINIR: COLOR DOMINANTE, SI ES ARCILLA O LIMO; SE DEJA SECAR AL AIRE Y LUEGO SE TIENE EN CUENTA SU COHESION Y SI SE PRODUCE POLVO	SI ES POSIBLE SOLO USAR COLOR DOMINANTE	. NINGUNO . ORGANICO . INORGANICO	. MUY BLANDO . BLANDO . FIRME	. BAJO . MEDIO . ALTO	. SUELTO . FIRME
ARCILLA < 0.002												

CUADRO 2.1. Descripción en Logeo para Suelos

### 2.1. Aguja de Bicat



(Se utiliza para calcular el tiempo de fragua en morteros de cemento)

un instrumento llamado *aguja de Bicat* (FOTO 2.1). Esta aguja cae desde una altura conocida (nivel de la superficie de la muestra) introduciéndose en el mortero. El inicio de fragua comienza cuando la aguja al caer no se introduce totalmente en la mezcla. Esta aguja sólo se usa para morteros de cemento.

En mezclas químicas, su inicio de fragua se determina a simple vista, colocando la muestra en un vaso de precipitación, inspeccionándola constantemente. Se sabe que se ha llegado al inicio de fragua, cuando se observa que el mortero tiene una parte espesa y lechosa.

**b.1.2. Fluidez marsh:** Es el tiempo que demora un mortero en fluir por un instrumento llamado *cono marsh* (FOTO 2.2 A Y C). Este cono tiene en la parte baja una pequeña tubería, dándole el aspecto de un embudo. El volumen empleado para este ensayo es de 1.5 lt pero para efectos de cálculos se tiene que corregir a 1 lt. La fluidez se expresa en segundos.

Los resultados obtenidos de viscosidad aparente a fluidez Marsh, nos van a servir para elaborar gráficas de fluidez

Vs. relación cemento/bentonita, fluidez  
Vs. peso específico de la lechada, etc.

**b.1.3. Factor de sedimentación:** Se refiere al porcentaje de desestabilización de un mortero luego de transcurridas dos horas. Se mide en una probeta, que por lo general es de 100 ml. Se toma como datos el volumen de los sedimentos. Esta prueba se hace para morteros de cemento (FIG. 2.4).

Una mezcla con un alto factor de sedimentación no es recomendable, porque al estar inyectando, el material más denso que conforma la mezcla, sedimentará en la parte baja de la fractura, quedando en la parte superior agua, lo cual nos hace deducir que la inyección no tendrá buenos resultados.

Cuando mayor es la velocidad de agitación de la mezcla, se reduce la decantación e incrementa la fluidez. Esta agitación rompe las aristas rugosas de las partículas de cemento, aumentando así la fluidez. Por otro lado, esta agitación acelera la hidratación del cemento y activa las propiedades tixotrópicas de la bentonita, reduciendo de esta manera la decantación.

El tiempo de mezcla tiene influencia sobre las propiedades de las lechadas, sin embargo no existe un acuerdo general acerca de cual es exactamente su efecto.

**b.2. Ensayo de inyección:** También llamado *deslave de gel*. Es una inyección en pequeña escala con un terreno simulado, en pequeños tanques cilíndricos.

La inyección de este terreno simulado tiene por finalidad, la preparación de una probeta o testigo, que posteriormente se usará en diversas pruebas, de las cuales las más importantes son: pruebas de permeabilidad y de compresión.

Para la ejecución de esta prueba se utiliza el siguiente equipo de laboratorio:

- Compresora de  $8.5 \text{ Kg/cm}^2$  (FOTO 2.3A)

Cilíndro de mezcla (FOTO 2.3B), posee una entrada en la parte superior por la cual ingresa el aire y una salida en la parte inferior para la conducción de la mezcla al terreno simulado. Este cilindro tiene una capacidad de dos litros.

Cilíndro simulador de terreno (FOTO 2.3c), con una entrada por la cual ingresa la mezcla y una salida de desfogo. El volumen de este cilindro es de dos litros.

Luego de terminada la inyección, se deja fraguar un tiempo determinado, para luego iniciar la prueba de permeabilidad.

**b.3. Ensayo de permeabilidad:** Es una prueba que nos permite conocer la efectividad de una mezcla impermeabilizando un terreno simulado. Para determinar la permeabilidad del testigo se inyecta agua a presión atmosférica mediante un equipo llamado *permeámetro* (FOTO 2.2B). El agua ubicada en la tubería satura la muestra momento en el cual se comienza a tomar el tiempo en que baja un cierto tramo. De los datos obtenidos se halla la permeabilidad con la siguiente fórmula :

$$K = 2.3 * (a*L/A*t) * \text{Log}(H_0/H_1)$$

donde:

<i>a</i>	Diámetro de la tubería
<i>L</i>	Tramo de prueba
<i>A</i>	Diámetro de prueba
<i>T</i>	Tiempo en segundos en que baja el agua un tramo $H_0 - H_1$
$H_0$	Altura inicial
$H_1$	Altura final



**Nota:** Esta fórmula no es la única aplicable en este tipo de pruebas.

El permeámetro está compuesto por una tubería conectada al cilindro simulador de terreno dentro del cual se encuentra el testigo, este tanque se coloca dentro de un recipiente para recibir el agua que sale por el desfogue. La tubería tiene una graduación expresada en centímetros, que tiene como cero el nivel del agua del recipiente (FIG. 2.5).

**b.4. Análisis de los resultados:** Para llegar a la mezcla más óptimas a inyectarse se siguen los siguientes pasos:

- Con los datos de fluidez marsh y factor de sedimentación, se grafican curvas, a ellos se les halla una tangente que hace  $45^\circ$  con la horizontal. Este punto de tangencia será el más óptimo para inyectar (punto de inyectabilidad máxima).
- De todos los resultados obtenidos se escojen determinados valores, según el criterio del ingeniero, para lo cual se debe tener en cuenta las características del terreno y decidir que datos considerar.

Con estos datos se preparan pruebas de permeabilidad; los morteros que arrojen valores más impermeables, serán los que

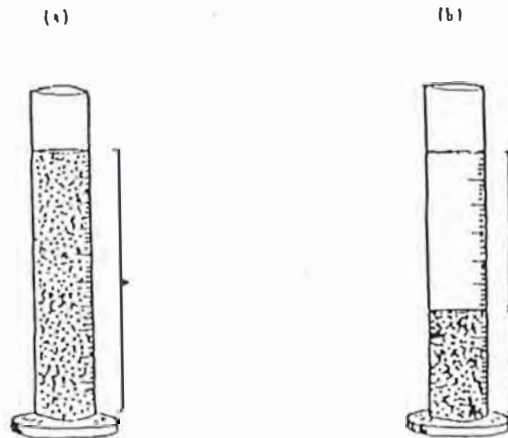


Fig. 2.4. Prueba de Factor de sedimentación  
 a) Inicio de prueba  
 b) Luego de transcurrido dos horas

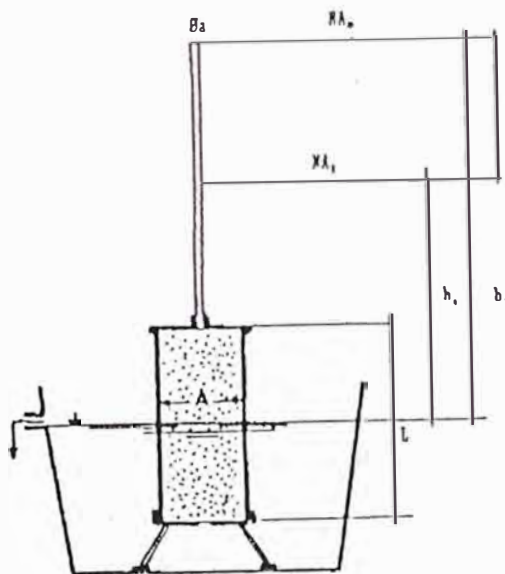


Fig. 2.5. Ensayo de permeabilidad

- $h_0$  = Sobrecarga hidráulica
- $h_1$  = Altura del nivel de agua del recipiente
- $A$  = Diámetro de Prueba
- $O_a$  = Diámetro del conducto
- $L$  = Tramo de prueba
- $T$  = Tiempo en el cual el nivel de agua baja de  $NA_0$  a  $NA_1$
- $NA_0$  = Nivel inicial de agua en el conducto
- $NA_1$  = Nivel final del agua en el conducto transcurrido un tiempo  $T$



2.2 a Cono Marsh  
b permeámetro



2.3. A compresora para simulación de inyección  
B Cilindro de Mezcla  
C Cilindro simulador de terreno

finalmente se inyectarán en un tramo de prueba. Es importante mencionar que para escoger las mezclas, hay que tomar en cuenta el índice de fluidez y porcentaje de sedimentación.

**Nota:** Las curvas que se grafican son:

Gráfica de inyectabilidad (fluidez vs. sedimentación) (FIG. 2.6).

- Relación experimental entre fluidez y cociente cemento/bentonita (FIG. 2.7).

Gráfico de diseño de mezclas de cemento - bentonita. (FIG. 2.8).

#### **2.1.2. Características y tipos de mezclas (Radaelli L., 1983)**

Las características importantes de una mezcla pueden ser divididas en dos clases:

Las características reológicas que influyen el flujo a través de suelo o roca.

- Las características mecánicas de las cuales depende el resultado de inyección en términos de permeabilización y/o consolidación.

Las características reológicas más significativas medidas en laboratorio son: viscosidad, rigidez, decantación, sineresis o exudación de coloides, filtración, baja presión y endurecimiento.

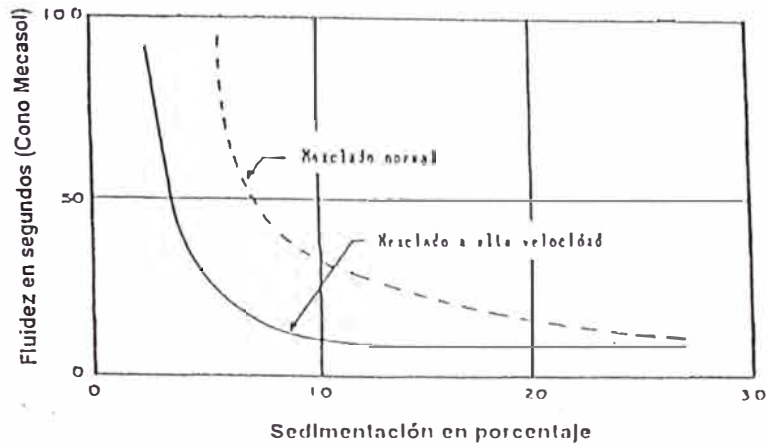


Fig. 2.6. Gráfica de Inyectabilidad para mostrar la influencia del mezclado a alta velocidad

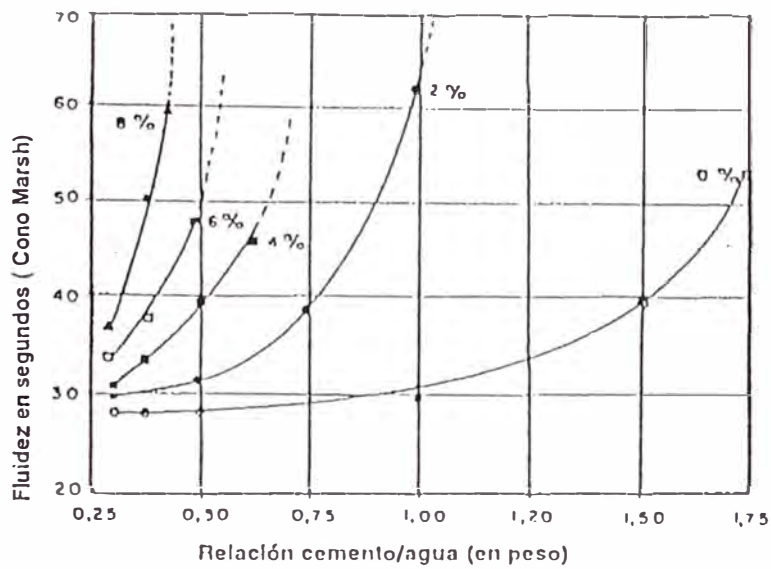


Fig. 2.7. Relación experimental entre la fluidez y el cociente cemento/bentonita

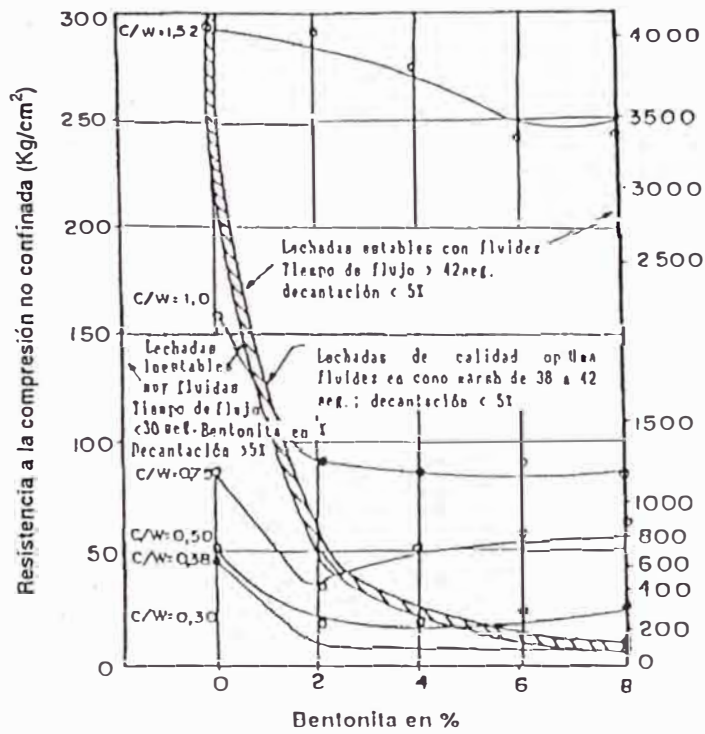


Fig. 2.8. Gráfica de diseño de mezclas de cemento - bentonita.  
 c/w = Relación de cemento/H<sub>2</sub>O en peso

CLASE REOLOGICA	SUSPENSIONES (FLUIDOS BINGHAMIANOS)			SOLUCIONES (FLUIDOS NEWTONIANOS)			EMULSIONES GASEOSAS	
	INESTABLE	ESTABLE		SOLUCIONES COLOIDALES (EVOLUTIVAS)*		SOLUCIONES PURAS (NO EVOLUTIVAS)*		
TIPOS DE LECHADAS	CEMENTO PURO	CEMENTO CON BENTONITA O ARCILLA	BENTONITA DECOFLULADA	PRODUCTOS QUIMICOS			LECHADAS EXPANSIVAS	
				SILICATO DE SODIO		RESINA ORGANICA	A BASE DE CEMENTO	ORGANICAS
				GEL DE ALTA RESISTENCIA ORGANICO	GEL DE RESISTENCIA MEDIA A BAJA			
CAMPOS DE APLICACION	ROCAS FISURADAS Y FRACTURADAS	ROCAS MICROFRACTURADAS O POROSOS				CAVIDADES	CAVIDADES CON FUERTE CIRCULACION DE AGUA	
		COMBINACION VARIABLE DE GRAVA Y ARENA						
		GRAVA	ARENA GRUESA	ARENA DE MEDIA A FINA	ARENA FINA LIMOSA			
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k (M/S)		$> 5 \times 10^{-4}$	$> 5 \times 10^{-5}$	$> 5 \times 10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$		
SUPERFICIE ESPECIFICA S (CM <sup>2</sup> /GR)		$< 50$	150	150	400	1000		
CRITICA DE INYECCION	PRESION DE RECHAZO	CANTIDAD Y PRESION LIMITADA				RELLENO		
COSTO REL. DE PROD. POR M <sup>3</sup>	1	0,6 A 1	0.5 A 0.7	5 A 7	2 A 4	15 A 40 (MONOMERO) 100 A 300 (POLIMERO)	1,2	6,0
<p>* VAN ESPESANDOSE PROGRESIVAMENTE HASTA FRAGUAR</p> <p>** SU VISCOCIDAD ES CONSTANTE HASTA EL FRAGUADO</p>								

CUADRO 2.2 RESUMEN DE LOS DIVERSOS TIPOS DE MEZCLAS

La característica mecánica normalmente medida es la resistencia a la compresión, que puede suministrar una indicación de cohesión y deformabilidad de un sólo tratado.

Las mezclas pueden ser divididas en cinco grupos principales de acuerdo con su comportamiento reológico que define el campo de aplicación.

*Emulsiones gaseosas*, usadas para rellenar cavidades en roca

*Mezclas inestables*, para consolidación y/o impermeabilización de rocas fisuradas.

*Mezclas estables*, para roca con fisuras finas, grava, arena gruesa (< 1 mm).

*Soluciones coloidales (evolutivas)*, para arena media a fina, 0,6 - 0,06 mm.

*Soluciones puras (no evolutivas)*, para arena fina, limo grueso, 0,06 - 0,02 mm.

A continuación se presenta un cuadro resumen de estas mezclas con sus principales características, aplicaciones, costos, etc.

**a. Mezclas estables:** Una mezcla estable no muestra tendencia a la sedimentación. A esta clase pertenecen, en orden creciente de penetrabilidad:



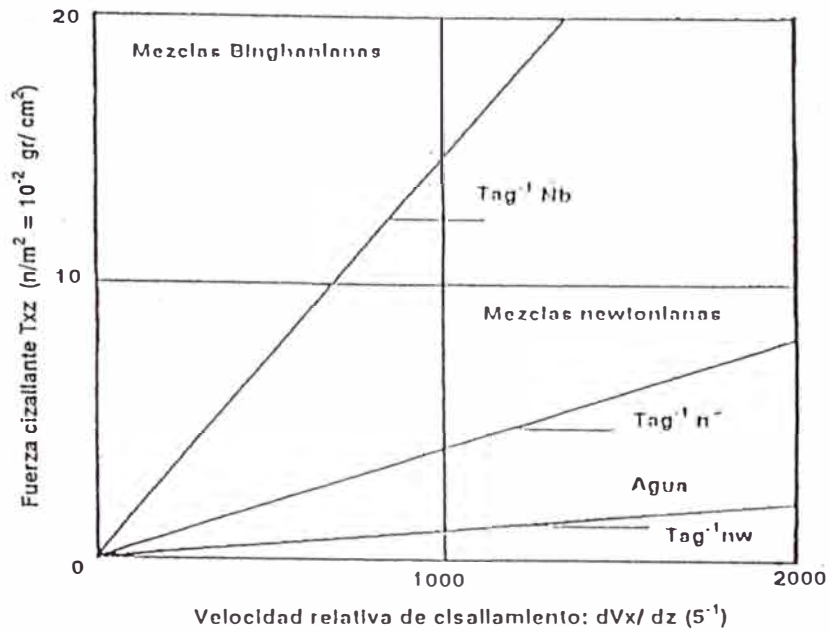
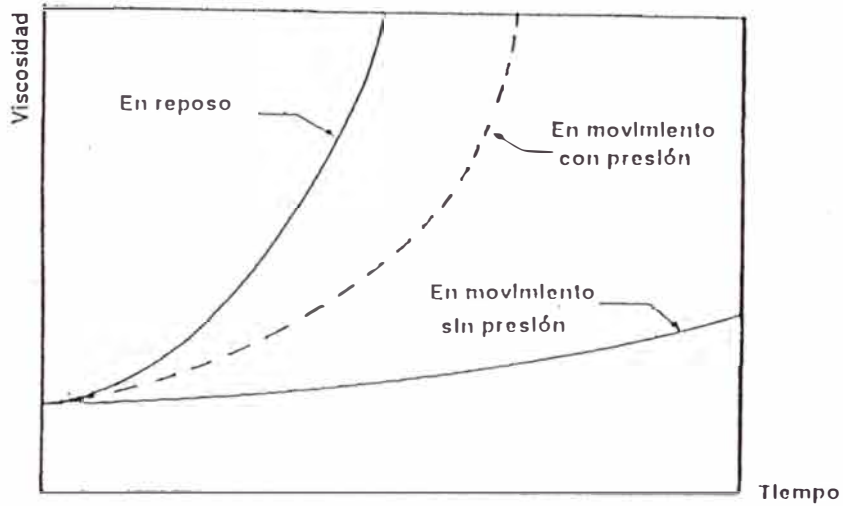


Fig. 2.9. Comportamiento reológico de los fluidos binghamianos (suspensiones) y newtonianos (soluciones).



2.10. Evolución de las características reológicas de mezclas Binghamianas. (suspensiones estables tixotropicas)

- Mezclas de cemento con argilita o bentonita.
- Mezclas de argilita o bentonita tratadas con productos químicos y usadas para impermeabilización.

El comportamiento reológico de esta clase de mezclas (FIG. 2.9) es determinada por la ley de Bingham:

$$T_{xz} = T_0 + n_b * dV_x/dz$$

donde:

$T_{xz}$  Fuerza cizallante necesaria para producir una velocidad relativa  $dV_x$  en la dirección  $x$  entre dos paredes planas y paralelos a distancia  $dz$ ;

$T_0$  Presión de cohesión o rigidez;

$\beta$  Viscosidad dinámica.

En este tipo de mezclas la viscosidad y, especialmente la rigidez, aumentan con el tiempo, conforme se muestra en la fig. 2.10.

El movimiento de una mezcla Binghamiana necesita de una cierta presión inicial para ser inyectada, presión que fue determinada experimentalmente por Cambefort a través de la siguiente expresión (FIG. 2.11):

$$i_{min} = H/R = 0.007 \cdot t_0 \cdot S_0$$

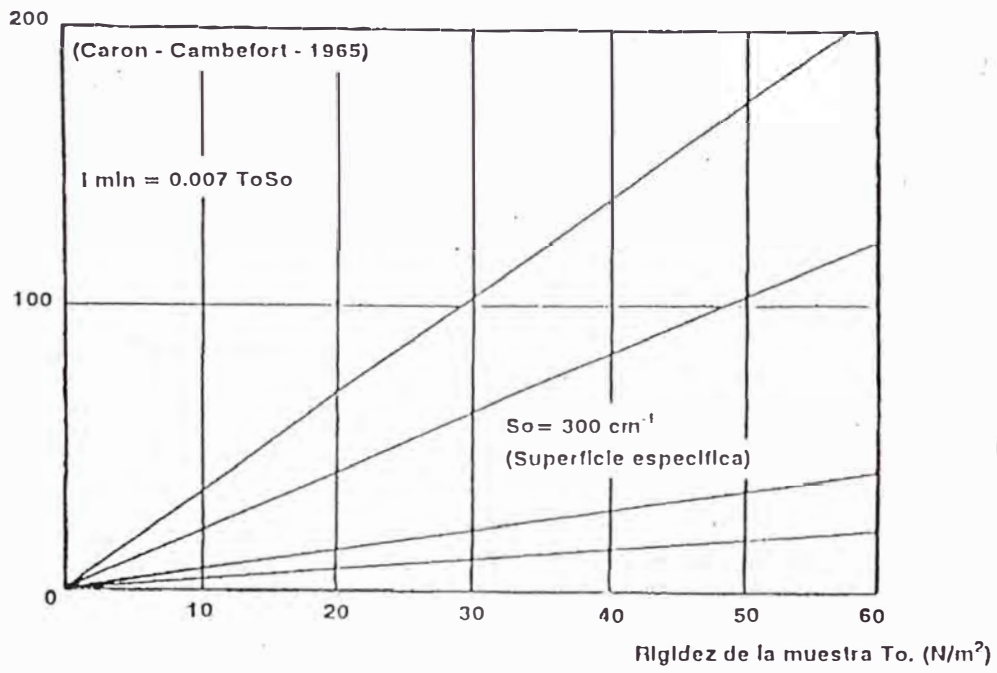


Fig. 2.11. Gradiente mínimo para la inyección de mezclas Binghamianas (suspensiones estables)

TIPO		PROPORCION (A/C)	SEDIMENTACION %	FLUIDEZ MARSH (SEG)	RESISTENCIA A LA ROTURA (KG/CM2)	PENETRABILIDAD	ADITIVOS O
CEMENTO ACTIVADO	CLASE DE DISPERSION	15-2.5	0 - 5	24 - 35	260	BAJA	- SIN ADITIVO
	QUIMICO				250		- CON EXPANSIVO
	FISICO	1.5 - 2.5	0 - 7	24 - 45	230	BAJA	- CON FLUIDIFICANTE
					20/140 *		- 20° C *
MECANICO	1.5 - 2.5	0 - 15	35 - 12	110/250	BAJA	- 40° C	
				250/430		- 50° C	
CEMENTO- BENTONITA		0.5 - 1	7.1 - 5.0 *** 10.4 - 9.2	30 - 45	**	BUENA	- 0 MIN.
					101/300		- 10 MIN.
					***		- 50 MIN.
							BENTONITA
					141/250 ***		2%
					54/53		4%

\* EL PRIMER VALOR CORRESPONDE A LA RESISTENCIA DE LA PROPORCION A/C=1.5 Y EL SEGUNDO DE 2.5, A UNA DETERMINADA T°

\*\* EL PRIMER VALOR CORRESPONDE A LA RESISTENCIA A LA ROTURA DE LA PROPORCION DE A/C=0.5 Y EL SEGUNDO DE 2.5, DESDE 0 MIN. A 50 MIN.

\*\*\* EL PRIMER VALOR CORRESPONDE A LA RESISTENCIA A LA ROTURA O SEDIMENTACION DE LA PROPORCION A/C =0.5 Y EL SEGUNDO DE 1.0, SEGUN EL % DE BENTONITA

CUADRO 2.3 CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS ESTABLES

Una vez superada la presión, para comenzar la inyección, aquélla debe ser continuamente aumentada para mantener un flujo constante y compensar el aumento de rigidez y viscosidad de la mezcla.

Finalmente, debe observarse que la penetrabilidad decrece a medida que se llega a la consolidación deseada.

En los dos extremos se tiene una mezcla rica en cemento (para consolidación) y una mezcla de bentonita tratada (para impermeabilización).

En esta clase reológica está incluido un gran número de productos con aditivos que reducen la sedimentación al mínimo.

Los tipos más usados son indicados en los items siguientes:

**a.1. Mezcla de cemento activado:** Las mezclas de cemento activado poseen un gran porcentaje de cemento ( $A/C = 1.5$  a  $2.5$ ), con prácticamente ninguna sedimentación, además esta dosis de cemento hace a la mezcla menos lavable e inmisible en agua. (*cambeport, 1968*) La aglomeración de los granos de cemento en una solución inestable son dispersos a través de los siguientes procesos:

Químicamente, con adición de fluidificante.

Mecánicamente, por medio de mezcladoras de alta rotación (1500 a 3000 RPM ).

Físicamente, por calentamiento de la mezcla hasta 25° ó 30° C.

Debido al alto % de cemento este tipo de mezclas tiene baja penetrabilidad y resistencia muy alta para servicios normales de consolidación.

#### **Dispersión de cemento por vía química**

Este método consiste en agregarle a la mezcla ciertos aditivos, tales como plastificantes, expansivos, etc, que impidan la floculación del cemento. La experiencia demuestra que si con estos productos de viscosidad no varía entonces la rigidez puede disminuir considerablemente (Cambefout H, 1968). Es importante determinar los productos que eleven la viscosidad y rigidez, ya que ello impide la penetrabilidad de la mezcla.

Para disminuir l sedimentación se pueden agregar aditivos que aumenten el volumen de la mezcla antes de su fragua. Estos normalmente son un polvo fino de aluminio que al reaccionar con la cal de cemento desprende burbujas de hidrógeno, (cambefout H, 1968). La resistencia a la

compresión varía según el aditivo que le agregue, así tenemos:

	1 día	14 días
cemento puro	122	260
cemento + G	24	290
cemento + f	16	230

G = aditivo expansivo

F = aditivo fluidificante

#### **Dispersión por vía física:**

Este fue descubierto y patentado como "Thermocol" por J. Florentin y G. L'Meriteau (1950). Este método consiste en recalentar la mezcla hasta una determinada temperatura, aunque también es factible calentar solo el agua, la temperatura debe de oscilar entre 25° y 35°. Cuanto mas fuerte sea la dosificación de la mezcla menor será la temperatura que debe de alcanzarse (Cambefort H. 1968). Así mismo se puede determinar que la rigidez de la mezcla aumenta con el tiempo de agitación, como se puede apreciar en el siguiente cuadro:Â

Temperatura	20°	30°	35°	40°	45°	50°
Rigidez ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> ) (7 minutos de agitación)	0.2	0.5	0.8	1.1	1.6	2.5
Rigidez ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> ) (14-15 minutos de agitación)	1.4	1.7	2	2.5	3.2	4.3

### Dispersión por vía mecánica

Se realiza a través de una agitación violenta, para la cual se necesita un mezclador especial. Con un tiempo relativamente corto, se obtiene una baja en la viscosidad y un aumento en la rigidez (Cambefort H, 1968). La fluidez marsh de estas mezclas normalmente oscila entre 35 y 12 seg., dependiendo de la T° y proporción de A/C, mientras que la resistencia a la rotura va de 101 a 133 Kg/cm<sup>2</sup>.

**a.2. Mezcla de cemento - bentonita:** Cuando la relación de agua/cemento es alta (1 a 2), una adición de 2 a 4 % de bentonita estabiliza la mezcla sin disminuir su resistencia (Cambefort H, 1968). Para A/C = 0.7 a 1 es válida estadísticamente la ley de Bolomey:

$$R = K (A/C - 0.5)$$

donde:

R resistencia a la compresión.



$K$  constante, que a los 28 días es igual a 60 N/cm<sup>2</sup>.

A medida que se aumenta el % de bentonita la viscosidad disminuye en mezclas de igual sedimentación, mientras que para mezcla donde la relación A/C es constante el aumento de bentonita aumenta la viscosidad y el límite de la resistencia al corte (Cambefor H. 1968.), según:

A/C	Sedimentación		Resistencia a la Compresión (28 días) Kg/cm <sup>2</sup>	
	2%	4%	2%	4%
0.5	7.1	5.0	141	250
0.7	9	7.4	128	143
1.0	10.4	9.2	54	53

Los Valores de fluidez marsh. Oscilan entre 30 y 45 seg.

**a.3. Mezclas de cemento - argilita:** Contrariamente a los tipos anteriores, donde la bentonita se adiciona para estabilizar una suspensión inestable, en esta mezcla de cemento se adiciona para dar resistencia mecánica a una suspensión estable.

Una vez fijada la relación A/C para obtener una cierta resistencia, la cantidad de argilita

puede variar conforme la naturaleza o tipo de mezclador, pero siempre será mayor que la cantidad de bentonita correspondiente.

Las dos mezclas iniciales son las más importantes, por lo que se les ha dado una mayor importancia, sin que ello quiera decir que la última no tenga aplicación. Existe una gran variedad de mezclas estables que tienen diferentes aplicaciones y escapan al presente estudio. En el Cuadro 2.3 se hace un resumen de las características de las mezclas anteriormente descritas.

### **2.1.3. Mecanismos de penetración de lechadas**

- a. Circulación en medios granulares (suelos):** La inyección de medios granulares, como depósitos aluviales, se puede lograr mediante dos procedimientos distintos, y por lo general simultáneos: el relleno y el rompimiento.

Se entiende por relleno al proceso de penetración de la lechada en los vacíos existentes entre los granos sólidos del suelo sin cambio de la estructura; y por rompimiento a la formación de grietas en el esqueleto sólido de aluvión y su relleno posterior.ä

**a.1. Mecanismo de relleno:** El análisis de este mecanismo se basa en las propiedades reológicas de las lechadas y en la teoría de filtraciones a través de medios porosos.

Si se idealiza la filtración de un líquido a través de un medio granular como el escurrimiento laminar de un fluido newtoniano en un tubo cilíndrico de radio  $R$ , se obtiene la fórmula de Kozeny:

$$R = (8k\mu/n\bar{O}g)^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$k$  permeabilidad del medio con respecto al fluido.

$\mu$  viscosidad del fluido a la temperatura de la inyección.

$n$  porosidad del medio.

$\bar{O}$  peso específico del fluido.

$g$  aceleración de la gravedad.

Un medio granular de permeabilidad  $k$  puede representarse mediante un grupo de tubos cilíndricos a través de los cuales el escurrimiento es laminar.

Si el fluido es de Bingham una parte central denominada núcleo (FIG. 2.12a) se desplazará como

cuerpo rígido. El radio  $r_0$  de este núcleo en lechadas que son cuerpos de Bingham es:

$$r_0 = \bar{a}_f r / \bar{a}_r$$

donde:

$r$  radio del tubo cilíndrico.

$\bar{a}_f$  límite de fluencia de la lechada.

$\bar{a}_r$  esfuerzo cortante correspondiente a un radio cualquiera  $r$  (FIG. 2.12b).

Cuando el esfuerzo cortante de las paredes del tubo  $\bar{a}_R$  se hace igual al límite de fluencia de la lechada  $\bar{a}_f$  el escurrimiento se detiene.

La fórmula

$$l = p(R/2\bar{a}_f)$$

permite obtener la profundidad límite de penetración  $l$  de una lechada con límite de fluencia  $\bar{a}_f$ , inyectada a una presión  $p$  en un medio poroso cuyos canales tienen un radio  $R$ .

La misma fórmula permite obtener el gradiente hidráulico límite que puede soportar una pantalla de lechada que tiene un determinado índice de fluencia  $\bar{a}_f$  en un medio de oquedades equivalentes a canales de radio  $R$ . Utilizando la primera fórmula, la ecuación anterior puede

expresar el gradiente hidráulico  $i$  de la manera siguiente:

$$i = 2\bar{a}_f / (8k\mu/n\bar{O}g)$$

**a.2. Mecanismo de rompimiento:** El procedimiento que consiste en inyectar, provocando grietas a través del terreno que son finalmente rellenas de lechada resulta satisfactorio sobre todo en problemas de tratamiento de aluviones con lentes de limo o de arcilla. Para inyectar el material limoso es necesario provocar la fractura.

Las grietas se forman siempre perpendiculares al esfuerzo principal menor que actúa en el terreno (FIG. 2.13).

El comportamiento del material a la falla obedece la ley de Coulomb, que en términos de esfuerzos efectivos puede expresarse como sigue:

$$((\hat{I}_1 + \hat{I}_3)/2) \operatorname{sen} \varnothing = ((\hat{I}_1 - \hat{I}_3)/2) - c(\operatorname{cos} \varnothing)$$

donde:

$\hat{I}_1$  y  $\hat{I}_3$  esfuerzos principales mayor y menor respectivamente.

$\varnothing$  ángulo de fricción.

$c$  cohesión.

Al incrementar las presiones de inyección en el barreno se reducen los esfuerzos efectivos

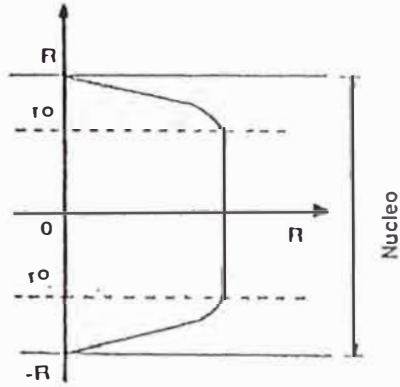


Fig. 2.12.a. Distribución de velocidades

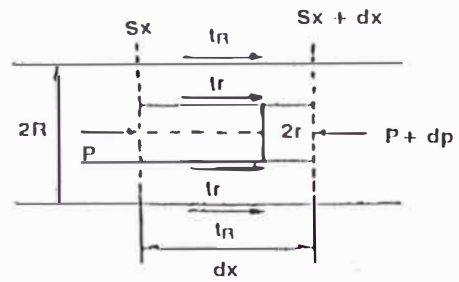


Fig. 2.12.b. Escurrimiento de un tubo cilíndrico

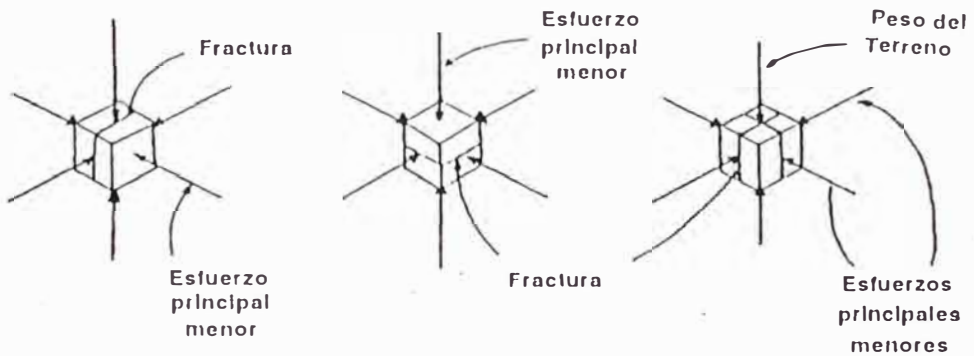


Fig. 2.13. Resultados experimentales muestran que la fractura aparece siempre perpendicular al esfuerzo principal menor.

debido al incremento de las presiones de poro. Se supone, para simplificar, que la presión de poro inducida es igual a la presión de inyección.

Antes de la inyección los esfuerzos efectivos a una profundidad  $h$ , en una masa en la que no existen esfuerzos tectónicos, y a una profundidad  $h_w$  bajo el nivel freático, son:

$$\hat{I}_1 = \hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w$$

$$\hat{I}_3 = K(\hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w)$$

donde:

$\hat{\sigma}$  peso específico del terreno.

$\hat{\sigma}_w$  peso específico del agua.

$K$  coeficiente de reposo ( $0 < K < 1$ ).

Al incrementar la presión efectiva hasta un valor  $P_e$  se tiene:

$$\hat{I}_1 = \hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w - P_e$$

$$\hat{I}_3 = K(\hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w - P_e)$$

de donde se obtiene para la falla:

$$P_e = (K/2)[\hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w][1 + \text{sen}^{-1}\phi] + (1/2)[\hat{\sigma}h - \hat{\sigma}_w h_w][1 - \text{sen}^{-1}\phi] + c \cdot \text{ctg } \phi$$

que se representa en la fig. 2.14.

Supongamos que el esfuerzo principal mayor  $f_1$  es el esfuerzo vertical, en tal caso la dirección de los planos de agrietamiento es la número 1 de la fig. 2.14. Conforme prosigue el rompimiento y relleno de las grietas formadas los esfuerzos horizontales se incrementan progresivamente hasta convertirse en esfuerzos principales mayores e inducir otro rompimiento perpendicular al anterior, cuya dirección corresponde a la número 2 de la fig. 2.14.

Cuando se inyecta para tratar suelos aluviales en la cimentación de una presa, la dirección 2 es aproximada a la horizontal y no contribuye a evitar el escurrimiento, resultando ineficiente y antieconómico el empleo de la lechada que rellena las fisuras con esta dirección. Conviene, entonces, colocar testigos superficiales para detectar el levantamiento del material debido al rompimiento horizontal. Este rompimiento, si aparece, no dañará la cimentación. De hecho, los levantamientos debidos a la inyección en la práctica siempre existen y son difíciles de evitar (Gilg B., 1970).

**b. Circulación en medios fisurados (rocas):** La inyección de la roca con lechadas inestables no es otra cosa que un relleno hidráulico al depositarse los sólidos en suspensión. Los sólidos se depositan cuando la



velocidad de la lechada es igual o menor que la denominada velocidad crítica de sedimentación. Por tanto, para determinar el radio de penetración de la lechada es necesario conocer la distribución de las velocidades desde la entrada a las fisuras en las paredes de la perforación.

En el instante en que se inicia la inyección de una lechada inestable, que es prácticamente un fluido newtoniano en una fisura de abertura constante, se cumple la relación:

$$Q = D/6\mu \ln(R/r_0) * pe^3$$

donde:

$p$  presión de inyección.

$Q$  gasto.

$\mu$  viscosidad de la lechada.

$e$  abertura de la fisura

$R$  distancia del punto de medición de la presión  $p$  al centro de la perforación (radio de penetración).

$r_0$  radio de la perforación.

Por otra parte, conociendo la presión aplicada es factible estimar la abertura inducida en la fisura, empleando fórmulas de Boussinesq (Sabarly F., 1968).

En una fisura que tiene una superficie de radio  $R$

(FIG. 2.15) sobre la cual se ejerce una presión  $p$ , el desplazamiento elástico en el centro del círculo es:

$$W(0) = 2(1 - \nu^2)Rp/E$$

y el borde del círculo:

$$W(R) = 4(1 - \nu^2)Rp/DE$$

siendo  $E$  el módulo de elasticidad de la roca y  $\nu$  su relación de Poisson. La fisura sufrirá una abertura igual al doble del desplazamiento estimado con estas fórmulas ( $e = 2W$ ) ya que la presión actúa en la misma forma sobre la superficie superior de la fisura. Por tanto, la abertura de la fisura es directamente proporcional a la presión de inyección. Además, tomando en cuenta que el gasto es proporcional al producto de la presión de inyección por la abertura de la fisura al cubo, el gasto puede expresarse en la forma siguiente:

$$Q = A p^4$$

es decir, como una cuarta potencia de la presión, donde  $A$  es función de la viscosidad, del radio de la perforación y del radio de penetración.

Esto explica que al efectuar pruebas de permeabilidad Lugeon se observe una presión a partir de la cual los consumos aumentan como si existiera una presión para la cual el material se fractura. Pero, en realidad, ese fracturamiento no existe y el aumento de la

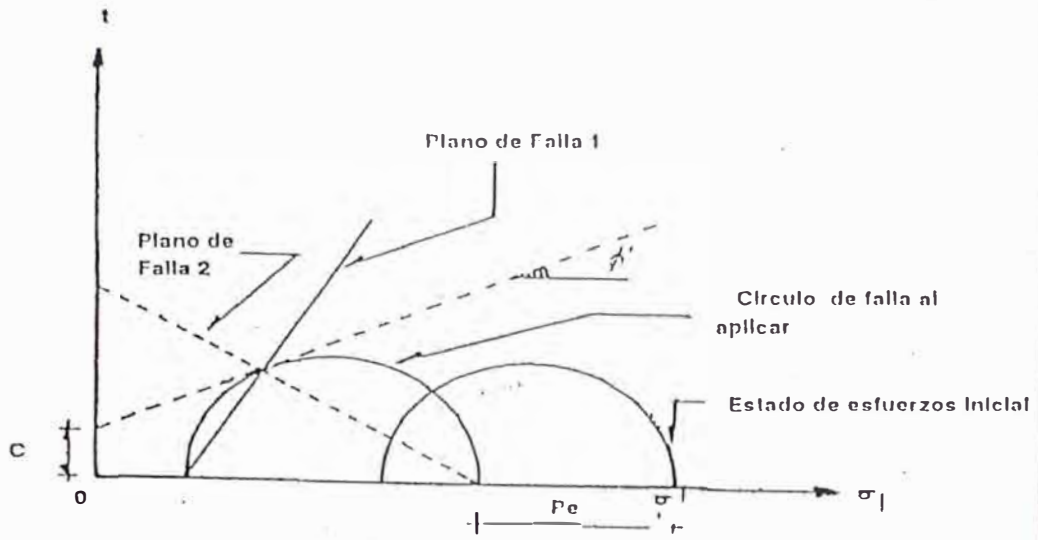


Fig. 2.14. Proceso de fracturación

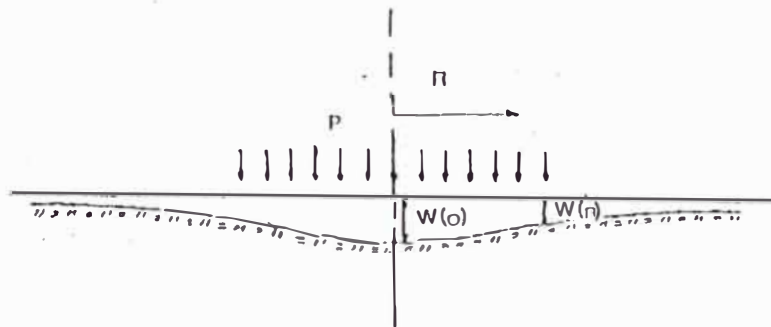


Fig. 2.15. Abertura de una fisura debido a una presión  $P$ .

absorción se debe únicamente a la abertura elástica de las fisuras al incrementarse la presión.

El Cuadro 2.4 (Cambefort H., 1968) da una idea de la penetración de la lechada en medios fisurados. Así, una permeabilidad al agua elevada, determinada previamente, puede deberse a que el macizo tiene una centena de fisuras finas donde la lechada no penetra porque las partículas sólidas de ésta son mayores que la abertura de las grietas. Por el contrario, en un medio de permeabilidad al agua baja, pero debida a una sólo fisura, podrá inyectarse lechada tomando precauciones y la absorción podría ser importante. Lo anterior demuestra que no existe correlación entre la absorción de agua y la absorción de lechadas agua-cemento.

CUADRO 2.4. Permeabilidad en función del número y abertura de las fisuras.

Número de unidades Lugeon	Longitud del tramo (m)	Abertura de una fisura (mm.)		
		1 fisura	10 fisuras	100 fisuras
100	6	0.484	0.225	0.106
	3	0.385	0.178	0.083
10	6	0.225	0.106	0.048
	3	0.178	0.083	0.038
1	6	0.106	0.048	0.022
	3	0.083	0.038	0.018

Para comprender el proceso del sellado por inyección de fisuras mediante lechadas inestables se recordará que la velocidad del fluido inyectado decrece hacia el interior de la grieta y que, por debajo de cierta

velocidad llamada crítica, las partículas sólidas se depositan obstruyendo el conducto. Es decir, que a partir de un punto en el interior de la grieta se forma un depósito de partículas sólidas (FIG. 2.16) que a medida que crece la sección del conducto disminuye y la velocidad del fluido aumenta. Datos experimentales muestran que la velocidad de erosión es muy superior a la velocidad crítica de sedimentación, por tanto, el material decantado permanece en su sitio. Aguas abajo del depósito la velocidad decrece en forma considerable, extendiéndose la sedimentación. El aumento de pérdida de carga resultante reduce el caudal inyectado por la bomba y la velocidad de la lechada disminuye aguas arriba produciéndose otra depositación. Al no alcanzarse la velocidad de erosión la fisura se rellena aguas arriba hasta llegar a la presión de inyección.

El relleno resultante no es completo puesto que queda una parte de la sección de la grieta por donde circula el fluido inyectado. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la presión de inyección ha aumentado la abertura de la fisura y que cuando se suspende la inyección las paredes de la grieta tienden a recuperarse comprimiendo el depósito y mejorando el relleno.

**c. Inyección de mezclas estables:** Empleando mezclas estables se superan las dificultades que se

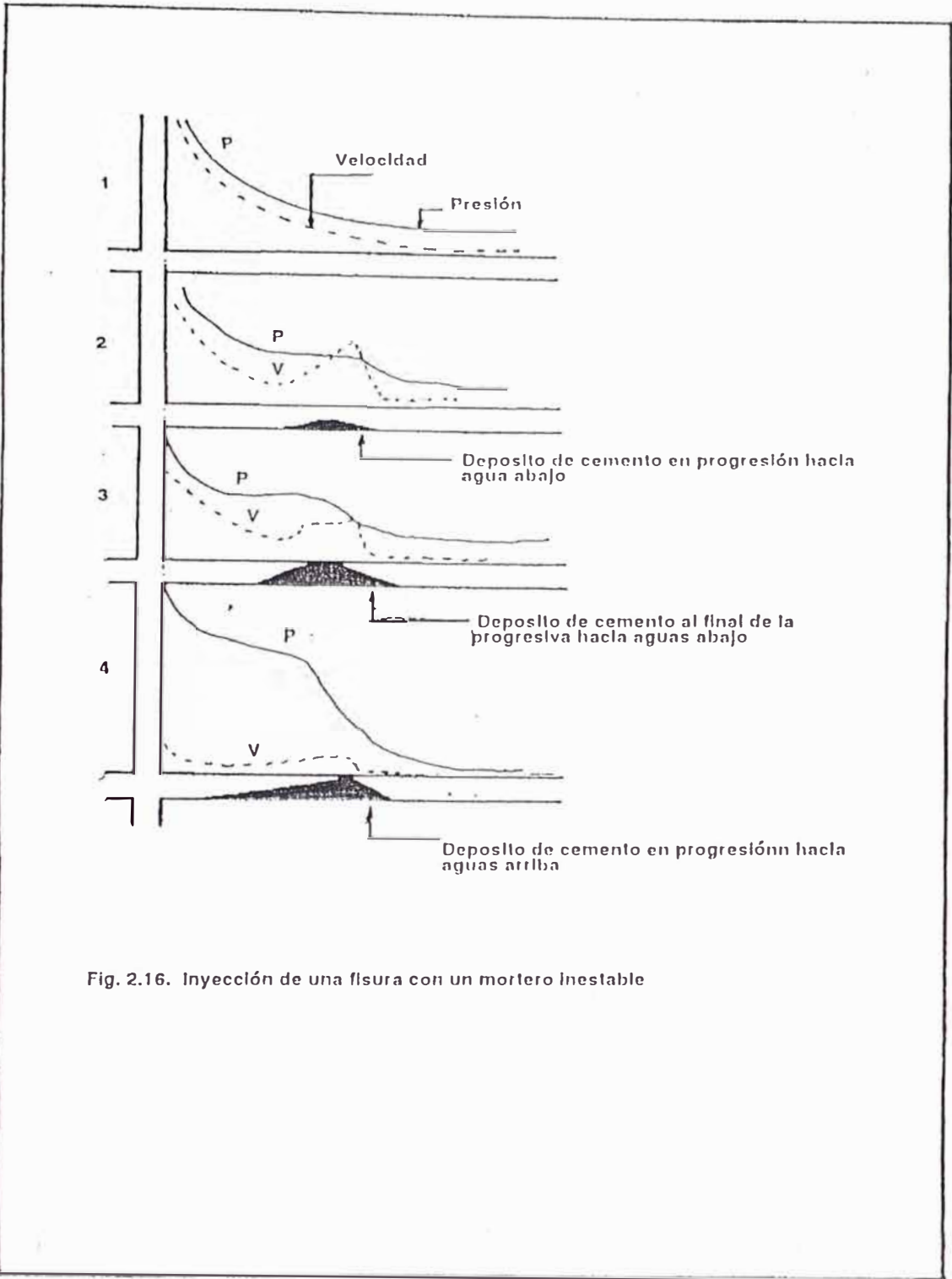


Fig. 2.16. Inyección de una fisura con un mortero inestable

encuentran al inyectar mezclas inestables. Se pueden enumerar las ventajas siguientes:

- No existe sedimentación ni en los tubos ni en la perforación, aunque la mezcla permanezca mucho tiempo en reposo.
- No es necesaria la línea de retorno.
- La fluidez de la lechada se mantiene y puede penetrar más lejos en las fisuras finas.
- Las cavidades grandes se llenan mejor debido a la ausencia de la sedimentación.
- Resistencia a la erosión del agua del subsuelo durante la inyección.
- No existe la posibilidad de que se extienda demasiado en fisuras grandes ya que debido a su comportamiento como líquido de Bingham tiene un límite de fluencia considerable que da a su superficie libre la posibilidad de permanecer estable con un cierto ángulo de inclinación.

La penetración de una mezcla estable en una fisura no es cuestión de la viscosidad de la misma sino de la presión de inyección. Con una mezcla de viscosidad alta se puede lograr el mismo flujo en una fisura con una presión más alta.

La penetración de una mezcla elaborada con partículas sólidas en una fisura fina depende del ancho de la

fisura con respecto al tamaño y cantidad de las partículas sólidas de la mezcla. Las partículas grandes sellan la entrada de la fisura evitando que la lechada penetre. Por esta razón es importante usar cementos finos y además libres de partículas gruesas. Este comentario es válido tanto para lechadas estables como inestables.

#### 2.1.4. Presiones de inyección

La presión de inyección es un parámetro importante que desempeña un papel limitante en la inyección, ya que ella podría indicar cuando termina.

La presión de inyección depende, inicialmente, del caudal; ello se deduce de las siguientes fórmulas (Cambefort H., 1968)

$$P = 6(vQ/De^3) * \ln(R/r_0)$$

donde:

$v$  viscosidad de la mezcla.

$Q$  caudal.

$R$  distancia a la cual la presión es  $P.0$

$r_0$  radio de la perforación.

En el  $\ln$  se considera constante al igual que  $v$ ,  $D$  y  $e$ .

La experiencia nos enseña que es mejor utilizar presiones altas porque con ello se asegura una buena inyección, ya que la mezcla penetra hasta en las fisuras



más cerradas; claro está que no debemos olvidar la geología del macizo a inyectar, porque se da el caso en el cual un determinado afloramiento no soporta presiones altas.

Independiente de la metodología que se esté aplicando en una inyección la presión siempre es un factor presente que se debe controlar para evitar casos de levantamiento del terreno como veremos a continuación.

**a. Presión de levantamiento o contrapresión:** (*Cambefort H., 1969*). Esta surge cuando la presión de inyección supera a la presión litostática en el punto medio de la inyección. Esta contrapresión produce levantamiento en la superficie e incluso puede llegar a fracturar el medio inyectado.

Sabemos que la fuerza que tiende a abrir una fisura puede obtenerse suponiendo que la presión medida en el taladro a la altura de la fisura se ejerce sobre un círculo cuyo radio es tres o cuatro veces más pequeño que el radio de acción de la inyección. Este resultado sólo es exacto si hay circulación en la fisura; salvo casos realmente excepcionales, esto tiene lugar siempre durante la inyección de un mortero.

Si la fisura inyectada es poco profunda y paralela a la superficie del suelo se podrá llegar a levantar el terreno, aumentando la presión. Calculemos esta presión límite suponiendo que el terreno levantado,

de peso específico igual a 2, se encuentra en un tronco de cono cuyo semiángulo en el vértice es igual a  $30^\circ$ . Para una profundidad de la fisura igual a 10 m y para un radio de acción de la inyección de 4 m,  $P_0$  es aproximadamente igual a  $16 \text{ Kg/cm}^2$ . Evidentemente este valor no constituye más que un orden de magnitud, pero está en perfecto acuerdo con la práctica. Cuando el macizo rocoso no está completamente desorganizado por su fisuración, puede aumentarse sin peligro. A 20 m de profundidad se encontraría en las mismas condiciones, con aproximadamente igual a  $70 \text{ Kg/cm}^2$ .

A pesar de su imprecisión, continuemos este análisis definiendo un orden de magnitud de la abertura de la fisura en curso de inyección. Para una fisura única es suficiente aplicar la fórmula *Boussinesq*. Hagamos dos aplicaciones con  $r = 4 \text{ m}$ , valor muy pequeño sin duda alguna:

En un macizo en el que  $E = 200000 \text{ Kg/cm}^2$ , bastante grande para una roca fisurada, una presión de  $50 \text{ Kg/cm}^2$  abre la fisura 2.5 mm.

En un macizo en el que  $E = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ , arcilla o arena, una presión de  $10 \text{ Kg/cm}^2$  abre la fisura 5 cm. Es probable que en ese preciso momento  $r$  no sea igual a 4 m. Si alcanza 10 m, por ejemplo, la abertura llega a 12.5 cm.

Tenemos así la explicación del fenómeno llamado contrapresión.

"Se dice que existe contrapresión cuando al detener la inyección el manómetro no se vuelve a cero. Basta entonces con abrir una válvula de descarga para que la perforación expulse el mortero, simplemente acumulado en una fisura ensanchada por la inyección". En cuanto 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. La fisura queda llena del mortero y conserva la abertura que le ha dado la inyección.

La fuerte compresibilidad de las arcillas, que permite una gran abertura de las fisuras debidas a la inyección, da a esta última un gran radio de acción. Pueden resultar graves consecuencias si las+ condiciones geológicas se prestan a ello.

Por eso es por lo que en una roca kárstica que contenga cavernas de grandes dimensiones, llenas de arcilla y relativamente poco profundas, la inyección puede provocar peligrosos levantamientos del terreno, incluso con presiones de algunos kilogramos por centímetro cuadrado, mientras que si las cavernas no existen se pueden utilizar sin peligro presiones elevadas.

Se ha dado un caso parecido en una inyección hecha a unos 10 m de profundidad, con una presión alrededor de  $5 \text{ Kg/cm}^2$ , donde apareció una fisura en una obra de fábrica que se realizaba en superficie. Al observar esta fisura, que era filiforme, se detuvo la inyección. Sorprendentemente se vió como la fisura se abría hasta alcanzar una abertura de unos 10 mm; se volvió a cerrar después para transformarse de nuevo en filiforme. Simplemente ocurrió que la arcilla desempeñó la función de un acumulador de presión, funcionando después de haber detenido la inyección, hasta que el mortero pudo discurrir por las resurgencias. Inyecciones próximas a ésta en las que en las que se alcanzaron hasta  $30 \text{ Kg/cm}^2$  no provocaron jamás un fenómeno parecido.+

Este ejemplo es muy instructivo porque muestra bien claro que la limitación de la presión no se corresponde sistemáticamente con la seguridad. Será necesario que las condiciones geológicas colaboren y esto es muy raro. Se corre el riesgo, limitando a priori las presiones de inyección a valores bajos, de que no se realicen tratamientos correctos, porque un aumento del número de perforaciones no puede reemplazar el efecto de altas presiones de inyección.

- b. Presión de rechazo:** Es una presión de inyección en la cual el caudal es relativamente bajo (0 a 5 lt/min); se logra luego de un determinado tiempo.

La inyección se inicia con una presión menor a la de rechazo; a medida que van rellenando las fracturas, la presión aumenta hasta llegar al rechazo.

Esta presión depende del peso específico de la roca, de la profundidad a la cual se va a inyectar, de la viscosidad de la mezcla, de la elasticidad del macizo rocoso y del radio de inyección. Si utilizamos una mezcla muy densa (alta viscosidad) se llegará pronto al rechazo pero sin llegar a las zonas más alejadas de las fracturas, y si se utiliza lechadas de baja densidad (poca viscosidad) la mezcla tenderá a alejarse demasiado de la zona de inyección y por lo tanto el rechazo sería difícil de alcanzar. También es necesario hacer notar que, a mayor profundidad, mayor será la presión de rechazo, siempre y cuando se esté en un medio isotrópico.

#### 2.1.5. Caudal de inyección

Es tan importante como la presión de inyección, ya que al igual que ésta, no determina el final de la inyección. Para hallar el caudal promedio en un tiempo  $T$  se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = Vol\ iny / T$$

donde:

$Q$  caudal de inyección

$Vol\ iny$  volumen inyectado en el tiempo  $T$

El caudal normalmente se controla cada 5 minutos. En una inyección normal, al iniciarse el caudal es relativamente alto comparado con el caudal final. A medida que se desarrolla el proceso el caudal va disminuyendo. Ello se debe al relleno paulatino de las fracturas. En general se cumple que a mayor presión el caudal aumenta y, si la presión disminuye, el caudal también disminuye. Esta regla es aplicable cuando no se está llegando a la presión de rechazo, ya que al llegar a esta presión el caudal disminuye ostensiblemente y la presión sube rápidamente.

#### 2.1.6 Metodo PxV o Gin

Este metodo de inyección hizo su aparición en la decada del 80 aplicandose con buen exito en paises como Estados Unidos, Argentina, México, Etc. En el Perú es la primera vez que se esta aplicando pero con una pequeña variante. El método original consiste en elevar la presión constantemente, a la vez que se baja el caudal, culminando la inyección por límite de volumen o por presión de rechazo. En el proyecto Presa Yuracmayo el método fue aplicado a la inversa, es decir que en vez de ir subiendo la presión, esta se fue bajando (ver del item 3.3.5.).

**a. Mezclas de inyección:** El rango recomendado de inyección es de 0,8:1 a 0,67:1, (agua/cemento en peso), es decir mezclas espesas con un aditivo super plastificante el cual le proporciona una alta fluidez y mayor penetrabilidad; así mismo la cohesión es

menor (Lombardi B. y G. & Degreg D., 1993): las mezclas más espesas han sido progresivamente reemplazando a las menos densas por que con aquellas se logra una mayor resistencia.

Las ventajas del uso de mezclas espesas sobre las delgadas (3:1 , 2:1, 1:1), son:

- La sedimentación es menor.
- La mezcla es más estable durante la inyección.

Ocurre una menor expulsión de agua propia de la mezcla; ésto evita bloqueos prematuros.

Menor porosidad y, por lo tanto, una mayor impermeabilización.

Para elegir la relación de agua/cemento se deben de realizar pruebas de laboratorio, teniendo en cuenta la sedimentación, cohesión, impermeabilización, peso específico, fluidez y resistencia a la compresión. Las pruebas deben ser en diferentes relaciones de agua/cemento y superplastificante. La dosis de superplastificante varía de 0,5 a 1 en peso de cemento. Los valores típicos obtenidos en el laboratorio, de estas propiedades, son peso específico de 1,59 a 1,67 gr/cc, fluidez marsh de 29 a 32 segundos, resistencia a la compresión a los 28 días de 15 a 20 mpa.

Mención aparte merece la cohesión, la cual normalmente es de 0,2 a 0,35 mm para lechadas espesas

sin superplastificante (la cohesión reportada es la cohesión relativa). Con adición de aditivos la cohesión relativa llega a valores de 0,08 a 0,15 mm (Lombardi B. y G. & Degreg D., 1993).

- b. Desarrollo del método GIN:** Las fisuras en un macizo rocoso pueden ser abiertas (anchas) o cerradas (finas), siendo su metodología de inyección diferente en cada caso.

#### INYECCION DE FRACTURAS ABIERTAS

Estas son las que pueden desplazarse de unos metros a varias decenas de metros, es por ello que el método GIN trata de reducir esos desplazamientos; para poder lograrlo se aumenta la densidad de la mezcla, la cohesión y se limita el volumen de inyección.

Se debe tener en cuenta la presencia de fisuras finas, las cuales no quedarían inyectadas con una mezcla gruesa, por lo que la mezcla debe mantenerse estable y moderadamente espesa (Lombardi B. y G. & Degreg D., 1993).

#### INYECCION DE FRACTURAS CERRADAS

Este tipo de discontinuidades, cuando están presentes, son las últimas en inyectarse, por lo que se requiere de una mezcla menos densa y de menor cohesión, a la vez que se aumenta la presión. Es más conveniente aumentar la presión y mantener la mezcla de inyección de gran calidad moderadamente espesa con



el superplastificante (*Lombardi G. & Degreg D., 1985*). La presión de inyección para estas fracturas puede oscilar entre 30 y 50 Kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de la condiciones geológicas del macizo.

- c. Separación de los agujeros de inyección:** Los taladros primarios (ver ítem 3.3.2.) deben de estar separados 10 a 12 m; los exploratorios deben ser primarios pero separados cada 20 a 24 m. Esto indica que los taladros estarán alejados 1,25 a 1,5 m uno de otro (si existen cuatro etapas de inyección). Culminada la inyección de los taladros primarios se efectúan los secundarios, ubicados equidistantes de los primarios. Esta etapa debe tener una menor toma ya que encontrará algunas fracturas selladas por la inyección de la primera etapa. A continuación se inyectan los taladros terciarios, ubicados a 2,5 ó 3,0 m de los anteriores. Si se requiere una cuarta fase, estos agujeros estarán separados 1,25 a 1,5 m de los anteriores. En general las tomas deben ir bajando a medida que se va construyendo una nueva fase de inyección. Como ejemplo se puede mencionar el caso peruano en el cual el volumen límite para los taladros primarios es de 2525 lt, los secundarios de 2500 lt, los terciarios de 2000 lt y los cuaternarios de 1500 lt.
- d. El método GIN o P\*V:** Se sabe que para inyectar un tramo determinado se necesita de una cierta energía; ésta es igual al producto de la presión por el

volumen, originando un gráfico de P\*V. Las unidades son bar \* lt / m.

En la fig. 2.17 se aprecia la posición final de los hoyos primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios, ploteados en la curva GIN. El volumen promedio consumido disminuirá de serie en serie, mientras la presión debe de ir aumentando.

- e. **Envolvente límite en el proceso de inyección:** La envolvente límite tiene como parametros la presión, volumen y el valor GIN, la combinación de ellas origina la envolvente límite para la inyección. Para determinar el volumen y presión límite se deben de realizar tramos de prueba en los cuales se inyecte la mezcla ya escogida. La fig.2.18. representa un taladro inyectado de prueba, en el se tiene fracturas abiertas hasta cerradas, cada una se comporta diferente ante la inyección. La curva 1 pertenece a una fractura abierta, se puede apreciar que el volumen de inyección es alto y la presión es baja. La curva 2 representa una fractura promedio, la presión y el volumen aumenta gradualmente, solo a partir del punto "A" aumento rapidamente. La curva 3 representa una curva hermética, se puede apreciar que la presión aumenta rapidamente, mientras que el volumen es bajo. La curva 4 representa una curva muy cerrada, en ella se observa que la presión aumenta rapidamente y el volumen de inyección es mínimo (Lombardi B. y G. & Deer D., 1993). Con estos datos se determina el valor

GIN, el cual oscila normalmente entre 2500 a 500 bar \* lt / m, aunque en la presa Yuracmayo se ha utilizado el de 10000, 7000 y 4000 bar \* lt / m. estos valores altos se deben al alto fracturamiento de la roca. Algunos autores recomiendan valores GIN bajos para zonas geológicas críticas (Cerca a superficie y sobre taludez inclinados)

**f. Determinación del Valor GIN:**

Los valores límites se mencionaron anteriormente, pero cabe la observación del cambio de los mismos por valores mas altos, dependiendo de las condiciones geológicas. Esto por lo general depende del diseñador, el cual debe de realizar tramos de prueba y definir los límites de inyección. Las presiones de los puntos bajos debe ser mayor que en los estribos, ello debido a que en la zona de valle la diferencia de altura con respecto a la corona de la presa es mayor.

**g. La Curva: Penetrabilidad Vs tiempo y Penetrabilidad Vs Volumen:**

La penetrabilidad es un factor de la inyección que al dividirlo entre el tiempo nos representa el relleno de las fracturas o vacíos y el aumento de la resistencia de inyección, causados principalmente por la fuerza de cohesión total, mientras el fluido de inyección se extiende a lo largo de las fisuras de las rocas. Un evento de hidrofracturación o

hidrorelleno puede ser observado por la presencia de una gráfica en forma de pico ( B y G lombardi de D Deere, 1993).

Para determinar la penetrabilidad en un instante se divide el caudal entre la presión ( $q/p$ ) lo que origina las unidades de l / min.bar (fig. 2.19)

La curva de penetrabilidad Vs volumen (fig. 2.20) es una curva similar a la anterior. Mientras la curva se va desarrollando, normalmente se aprecia una declinación de la penetrabilidad, indicando que la eficiencia de la inyección esta disminuyendo. Esto si es una presión de inyección constante, la cantidad de flujo de inyección disminuye o si una cantidad de flujo constante se mantiene (casi al final), la presión de inyección aumenta (B y G lombardi de D. Deer, 1993). La declinación de esta curva nos indica un proceso normal de inyección.

**h. El método GIN con respecto al método usual:**

El método usual de inyección consiste en definir la presión de rechazo y el uso de varias mezclas (4:1 y 3:1, 2:1, 1:1, etc) el cambio de mezcla se realiza a un determinado volumen de inyección, como el cambio es de una mezcla delgada a una más densa es obvio que la cohesión de las mezclas ira aumentando, y la penetrabilidad bajara hasta detener el proceso de inyección. Con el método GIN solo se utiliza una mezcla por lo tanto la cohesión es constante. La

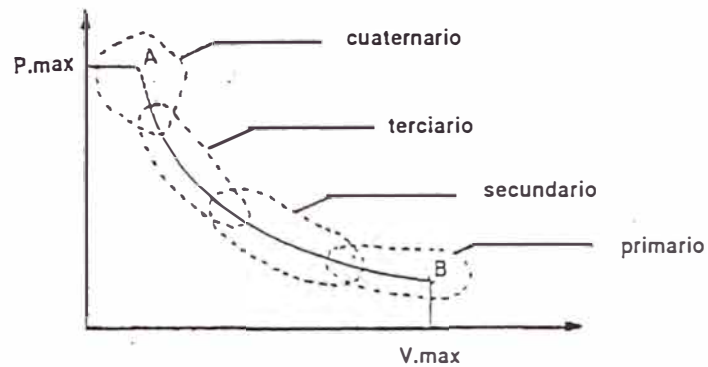


Fig. 2.17. Ejemplo de resultados de inyección para cortinas de inyección

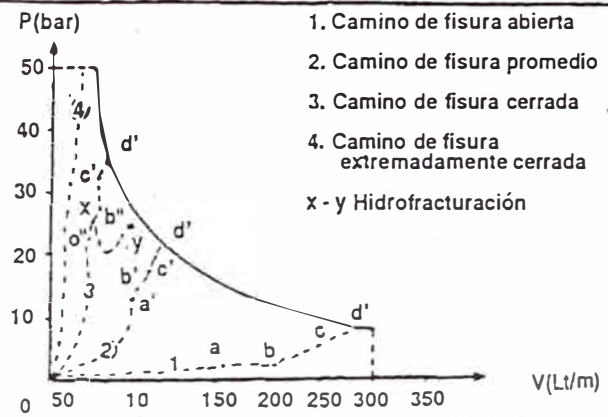


Fig. 2.18. Ejemplo de curvas de inyección, mostrando varios caminos

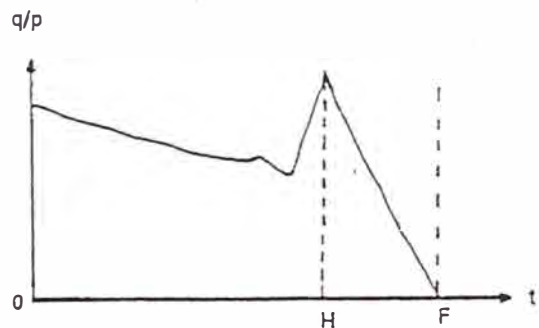


Fig. 2.19. Curva de penetrabilidad Vs Tiempo (Lt/min.bar)

- O Comienzo de relleno
- H Hidrofracturamiento
- F Fin de la inyección

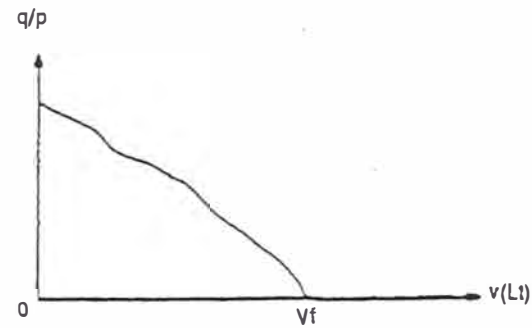


Fig. 2.20. Curva de penetrabilidad Vs. Volumen de Inyección

cohesión aumenta a medida que se extiende por las fracturas, ello por el mismo rozamiento de la mezcla con las paredes de la fractura. A medida que la mezcla se aleja del punto de inyección la presión aumenta por lo que la penetrabilidad disminuye, hasta que la mezcla se detiene. La inyección culmina cuando se alcanza la presión de rechazo, el volumen límite o una combinación de ambos.

Otras diferencias entre el método tradicional y el método GIN, son: En el método GIN el esfuerzo, la durabilidad, la resistencia a la lixiviación y contracciones es la misma en cualquier área de inyección. En el método de  $P * V$  el volumen de inyección es bajo ya que utiliza solo lo necesario, así mismo el riesgo de hidrofracturamiento o hidrorelleno disminuye.

#### **2.1.7. Límite de inyectabilidad**

Existen dos formas de determinar el límite de una inyección: mediante el tamaño de grano y mediante la permeabilidad del medio a inyectar. Los ensayos realizados en el laboratorio para determinar este límite no son del todo correctos ya que se utiliza un material uniforme olvidándose que en el terreno los granos no tienen el mismo diámetro y por ende hay unos vacíos más grandes que otros. Así mismo, no se tiene en cuenta la plasticidad del macizo; es debido a ello que estos resultados no son del todo confiables, pero a pesar de ello nos brindan una idea de las posibilidades de

inyección de un determinado mortero. Los resultados de las pruebas de laboratorio efectuados por diferentes autores se observan en la fig. 2.21 (Cambefort H., 1968).

Un método más efectivo para hallar el límite de inyectabilidad es el basado en la permeabilidad del macizo (FIG. 2.22).

La ventaja que presenta la elección del coeficiente de permeabilidad para fijar el límite de penetrabilidad es evidente. En efecto, es prácticamente imposible comparar curvas granulométricas incluso próximas, mientras que es muy fácil comparar coeficientes de permeabilidad. Además, ésta puede ser calculada in situ, mientras que la granulometría hace absolutamente abstracción del grado de compacidad del medio. A pesar de su imprecisión este criterio es, con mucho, el mejor (Cambefort H., 1968).

Este límite de penetrabilidad debe ser, sin embargo, considerado como una curiosidad de laboratorio. La experiencia demuestra que la penetrabilidad en un suelo real es superior a la definida en laboratorio, probablemente a consecuencia de las deformaciones del suelo; por otra parte, no es necesario impregnar perfectamente toda la zona tratada para lograr que ésta quede impermeabilizada (Cambefort H., 1968).

Estas divergencias con la teoría son las que han permitido a la inyección de aluviones desarrollarse

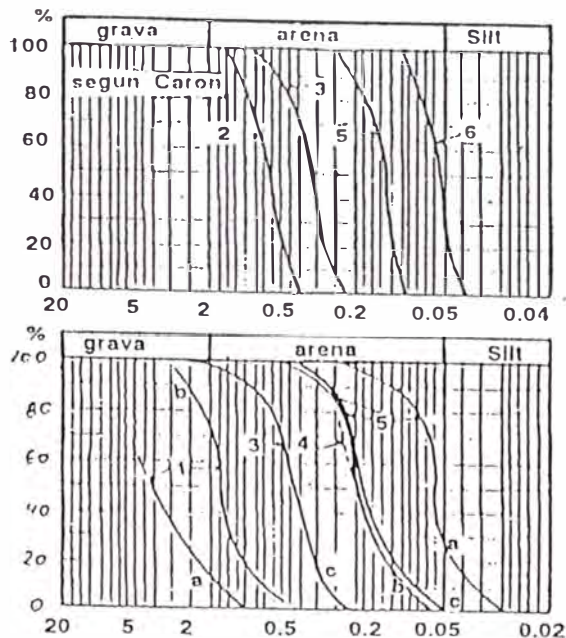


Fig. 2.21. Límite de permeabilidad de los morteros basados en la granulometría

- |                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| 1 Cemento               | 6 Emulsión de betún resina |
| 2 Arcilla - Cemento     | a Según Newmann            |
| 3 Arcilla               | b Según Golber             |
| 4 Procedimiento Joostes | c Según Rockwell Smith     |
| 5 Gel de Silice         |                            |

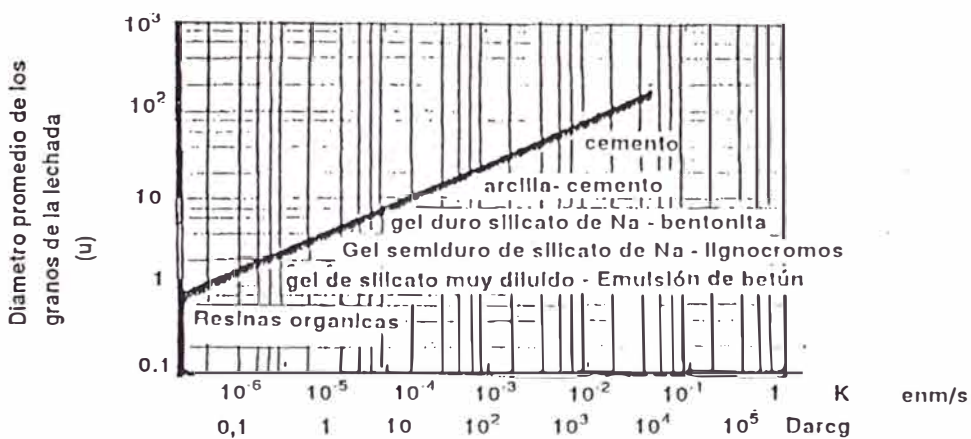


Fig. 2.22. Límites de penetrabilidad de los morteros basados en la permeabilidad del terreno



ampliamente en estos últimos años. Los ensayos en laboratorio han tratado de explicar, simplemente, el éxito de los trabajos, pero hemos de lamentar sus deficiencias. Estos ensayos definen un límite que sólo la experiencia permite interpretar correctamente (Cambefort H., 1968).

## **2.2. APLICACIONES DE LAS INYECCIONES**

En la actualidad las inyecciones de cemento tienen una amplia gama de aplicaciones en la construcción de obras civiles de gran envergadura, tal es así que existe una especialización en este tema. Las inyecciones no solo se aplican en obras civiles, también son utilizadas para regenerar obras de fábrica, impermeabilizar o consolidar un área dentro de una mina, etc.

### **2.2.1. Medios inyectables (Cambefort H., 1968)**

La inyección utilizada como procedimiento de construcción tiene por objeto impermeabilizar, rellenar o consolidar los cuerpos sólidos porosos y permeables, tales como rocas fisuradas, arenas y gravas o aluviones, así como fábricas defectuosas.

Para alcanzar estos resultados se rellenan los huecos del medio a tratar con un producto líquido que se solidifica, más o menos, con el tiempo. Se procura alcanzar mayor consistencia en los trabajos de consolidación que en los de impermeabilización. El líquido inyectado se conoce con el nombre de mortero de inyección o mezcla. Para introducir el mortero se le

hace penetrar a presión por los taladros realizados a través de los huecos a inyectar.

No obstante, huecos aparentes como ciertas fisuras, por ejemplo, pueden inyectarse sin que sea necesario realizar taladros. Es suficiente con introducir el conducto transportador del mortero y evitar la circulación de éste hasta la superficie del cuerpo a tratar.

Estas circulaciones parásitas, conocidas con el nombre de *resurgencias*, pueden producirse incluso cuando la inyección se efectúa por medio de taladros. Constituyen siempre una dificultad para la buena ejecución del trabajo.

Los morteros de inyección y los métodos utilizados son diferentes, según sea la forma de los huecos a rellenar. Estos pueden clasificarse en dos categorías:

- Fisuras.
- Huecos de suelos sueltos o incoherentes.

Mientras que una fisura puede considerarse de abertura sensiblemente constante, los huecos de suelos sueltos son desiguales y sucesivamente grandes y pequeños.

Esta diferencia en la forma de los huecos hace que la inyección de aluviones se practique de manera diferente. De ahí que la resolución de este problema de forma económica se lograra mucho tiempo después que el de las fisuras.

En la actualidad se utilizan las inyecciones de cemento en gran parte de las construcciones de obras civiles o en reponerlas de algún daño. Su uso, cada vez mayor, ha conllevado a la aparición de diversos tipos de inyecciones, tales como consolidación, impermeabilización, contacto, etc., que son tratados más adelante. Estas inyecciones tienen la característica común de que son efectuadas a determinada presión y siempre llevan cemento. Según el medio a inyectar y su utilización, de éste se escogen las dosificaciones y presiones de inyección, tomándose todas las precauciones posibles para que la inyección sea satisfactoria.

A continuación se hace una breve descripción de los diversos medios posibles a inyectar:

**a. Obras de fábrica:** En una fábrica defectuosa pero no fisurada pueden encontrarse dos clases de huecos o poros, según se trate de gravas mal cementadas o de juntas desguarnecidas de mortero, en el caso de sillares o mampuestos.

Las fábricas pueden inyectarse de la misma forma que los suelos. Sin embargo, su ejecución es mucho más delicada porque, como consecuencia de su menor espesor, no es posible someter la mezcla inyectada a presiones elevadas, si no se quiere correr el riesgo de agrietar la obra o producir resurgencias de imposible extinción.

Señalemos que la regeneración de un mortero completamente descompuesto, cuya arena se hubiera desprendido, es tan difícil de realizar, si no lo es más, que la consolidación de una arena fina. Tan sólo con productos químicos de gran costo podría acometerse, pero cuidando que haya desaparecido la casi totalidad del aglutinante del mortero, ya que, en caso contrario, la inyección sería imposible.

Encontramos, pues, en las fábricas defectuosas casi todos los casos de inyección posibles, pero es necesario ser un especialista muy experimentado para poder determinar si su tratamiento puede ser eficaz.

- b. Rocas kársticas:** Las rocas kársticas son, en general, rocas calizas en las que aguas subterráneas han creado como resultado de la disolución de zonas importantes, cavernas enlazadas por pozos, túneles, sifones, etc.

Cuando los karts son accesibles hay que taponar con hormigón todas las zonas visiblemente afectadas por la disolución, pero esto no es siempre posible ni fácil. Se recurre entonces a la inyección que, en el caso presente, es más bien un relleno que inyección propiamente dicha.

La dificultad en el tratamiento de estas rocas proviene de que los karts son, en general, poco numerosos, por no decir que son aislados los lugares donde se hallan. Tienen un trazado caprichoso e

invisible desde la superficie; son de grandes dimensiones y frecuentemente son recorridos por una corriente de agua. No es suficiente, pues, para impermeabilizarlos, establecer una pantalla de perforaciones e inyectar como se hace en las rocas normalmente fisuradas.

Cuando una o varias perforaciones desembocan en los karts, es preciso inyectar toda una gama de productos para detener las disoluciones y evitar el deslavado por las aguas subterráneas. Cada caso que se presenta es distinto de los anteriores, no pudiéndose establecer ninguna regla que resuelva los problemas que van presentándose.

Así es como en la presa de Charmine (*Rivière y Lescaïl, 1955*) la inyección de una sólo perforación fue suficiente para suprimir casi la totalidad de las infiltraciones. Pero fue necesario inyectar alrededor de 20000 m<sup>3</sup> de diversos productos, de los que 2630 fueron de gravilla y 540 toneladas de mortero de inyección ternario.

- c. Rocas fisuradas:** Las rocas fisuradas están caracterizadas por tal abundancia de fisuras que una perforación ejecutada en cualquier punto es susceptible de absorber una cantidad de la mezcla inyectada más o menos importante. No siempre ocurre así en el caso de las rocas kársticas.

Independientemente del número y de la magnitud de la abertura de las fisuras, hay que tener en consideración la calidad de la roca propiamente dicha para elegir el método de inyección a emplear.

Las rocas porosas fisuradas, tales como areniscas, no son tratadas de la misma forma que las rocas impermeables.

En efecto, corresponde a esta porosidad una pequeña permeabilidad que puede provocar una desecación del fluido en su circulación por las fisuras. Las propiedades del fluido evolucionan entonces demasiado rápidamente para que la inyección sea satisfactoria.

En oposición a esta pequeña permeabilidad se llama gran permeabilidad aquella que facilita la circulación en las fisuras.

Para determinar el método de inyección y la naturaleza del mortero a inyectar, mejor adaptado al tratamiento que se proyecte, es necesario establecer algunas precisiones sobre el estado de fisuración de la roca y sobre la posibilidad de circulación de las aguas. El reconocimiento por pozos, galerías y zanjas es excelente pero resulta largo y costoso y no permite fácilmente realizar reconocimientos de circulación de aguas. También se recurre a los sondeos para completar los informes obtenidos por el procedimiento anterior o para sustituirlo. En estos

sondeos se hacen siempre reconocimientos por inyección de agua llamados *ensayos Lugeon*.

- d. Suelos incoherentes:** Los suelos incoherentes o sueltos pueden estar constituidos por aluviones de arenas y gravas o por derrubios de ladera. Por extensión serán también los constituidos por depósitos de cantos mal cementados o restos de morteros descompuestos.

Estos suelos están caracterizados por un índice de huecos importantes (del orden de 20 a 35 %) mientras que en una roca muy fisurada este porcentaje es de un 3 % aproximadamente.

Por el contrario, ciertos fenómenos, como por ejemplo la segregación del mortero que se está inyectando o la impreganación incompleta de todos los poros por ese producto, no pueden explicarse más que por la morfología de los poros. Hasta la fecha no se ha logrado determinar esa morfología más que en laboratorio, inyectando mercurio a presión en muestras previamente preparadas. El resultado de este ensayo demuestra la existencia de una auténtica variación en el tamaño de los poros, los cuales están lejos de tener la misma dimensión. Esto permite explicarse por qué todos los poros de un suelo incoherente no pueden quedar rellenos de mortero al tiempo de efectuar la inyección.

Ante la dificultad de definir esta morfología nos conformaremos con investigar la permeabilidad del suelo, que nos dará una idea de la dimensión de los poros más numerosos. Esta permeabilidad es determinada a partir de ensayos de bombeo en pozos filtrantes o más fácilmente con *ensayos Lefranc*.

### 2.2.2. Tipos de inyecciones

Las inyecciones tienen diferentes aplicaciones tales como impermeabilización, consolidación, contacto y relleno, etc. Estos tipos de inyecciones, a su vez, se pueden usar en diferentes trabajos como veremos a continuación.

**a. Inyecciones de impermeabilización:** Son las más difundidas ya que su uso es aplicado en cualquier tipo de presa, aunque no es exclusivo de ésta. Como su nombre lo indica, este tipo de inyecciones se efectúan con el fin de impermeabilizar una determinada área mediante mezclas de cemento, bentonita, arena, silicato de sodio, etc., o una combinación de ellos que penetran en los espacios vacíos de la roca o suelo.

Otras aplicaciones que se le dan a este tipo de inyecciones son:

Impermeabilización de galerías en minas halladas debajo del nivel freático.



- Impermeabilización de galerías ubicadas bajo el río.
- Construcción de edificios, centrales térmicas, hidroeléctricas, etc., cuyas bases se hallan debajo del nivel freático.

**b. Inyecciones de consolidación:** Se realizan en suelos y rocas; se efectúan en superficie o a profundidades relativamente bajas. Este tipo de inyección consiste en consolidar zonas de baja resistencia o áreas debido a la excavación (en túneles) que por detonación de carga han quedado fracturadas.

**c. Inyecciones de contacto:** Se utilizan para rellenar los espacios vacíos dejados entre la roca y el concreto en la construcción de un túnel revestido. Las presiones utilizadas son bajas; están en el orden de 10 a 30 Kg/cm<sup>2</sup>; esto es comprensible porque este tipo de inyecciones tienen por lo general una profundidad que varía entre 0.30 a 1 m.

La metodología de estas inyecciones es:

- Terminado el revestimiento se efectúan perforaciones cada metro y medio, a 3 filas (FIG. 2.23a) cuyas profundidades dependen del grosor del revestimiento.
- Una vez perforados los huecos se colocan tubos de 1" de diámetro en la boca de dichas perforaciones, con una válvula (FIG. 2.23b).

Realizado este trabajo se efectúan las inyecciones respectivas (FIG. 2.23c).

Las lechadas utilizadas son, por lo general, mezclas estables o inestables, pudiendo en casos excepcionales utilizar morteros.

- d. Inyecciones de relleno:** Se realizan cuando existe derrumbe de la bóveda y hastiales en una galería, aplicable especialmente cuando éste es considerable y sobrepasa 0,5 m del límite de techos a paredes (FIG. 2.24). Esta excavación natural se produce cuando el macizo rocoso es bastante fracturado o se tiene la presencia de una zona de falla. La metodología que se aplica para resolver este problema es:

Se espera el momento en el cual la excavación natural se estabilice.

Se procede a colocar cimbras y planchas de acero de 0,4 m de espesor a distancias variables, según sea el caso (pueden ser de 0,50, 0,60, 0,90 ó 1,20 m).

Se dejan zonas de la bóveda sin colocar planchas con la finalidad de permitir el ingreso a la parte derrumbada, en la cual se colocan sacos de polietileno conteniendo arena y cemento. La humedad natural del terreno originará posteriormente su solidificación.

Una vez culminada esta operación se aplica concreto lanzado (shocrete) en la zona afectada; se deja

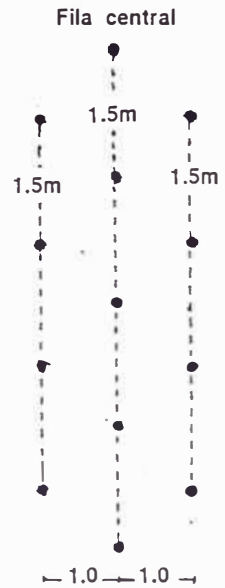


Fig. 2.23. a. Disposición de los taladros en las inyecciones de contacto

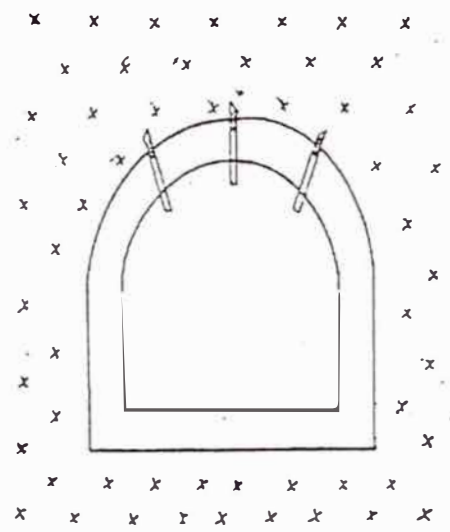


Fig. 2.23.b Los taladros son perforados según la profundidad a la cual se halle el contacto roca - concreto

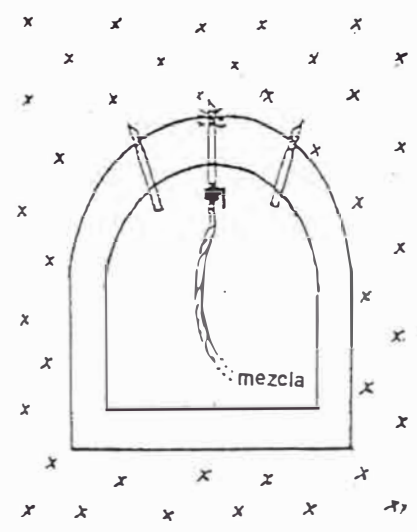


Fig. 2.23.c Una vez terminada la perforación se procede a inyectar dicho taladro

pasar un tiempo prudencial para que las bolsas de polietileno se consoliden, al término de lo cual se realizarán perforaciones en las zonas más afectadas. La profundidad de los taladros está en función de la altura de la excavación.

Una vez terminada la perforación se instala una tubería ranurada a través de la cual se hará la inyección de relleno con determinadas lechadas y/o morteros.

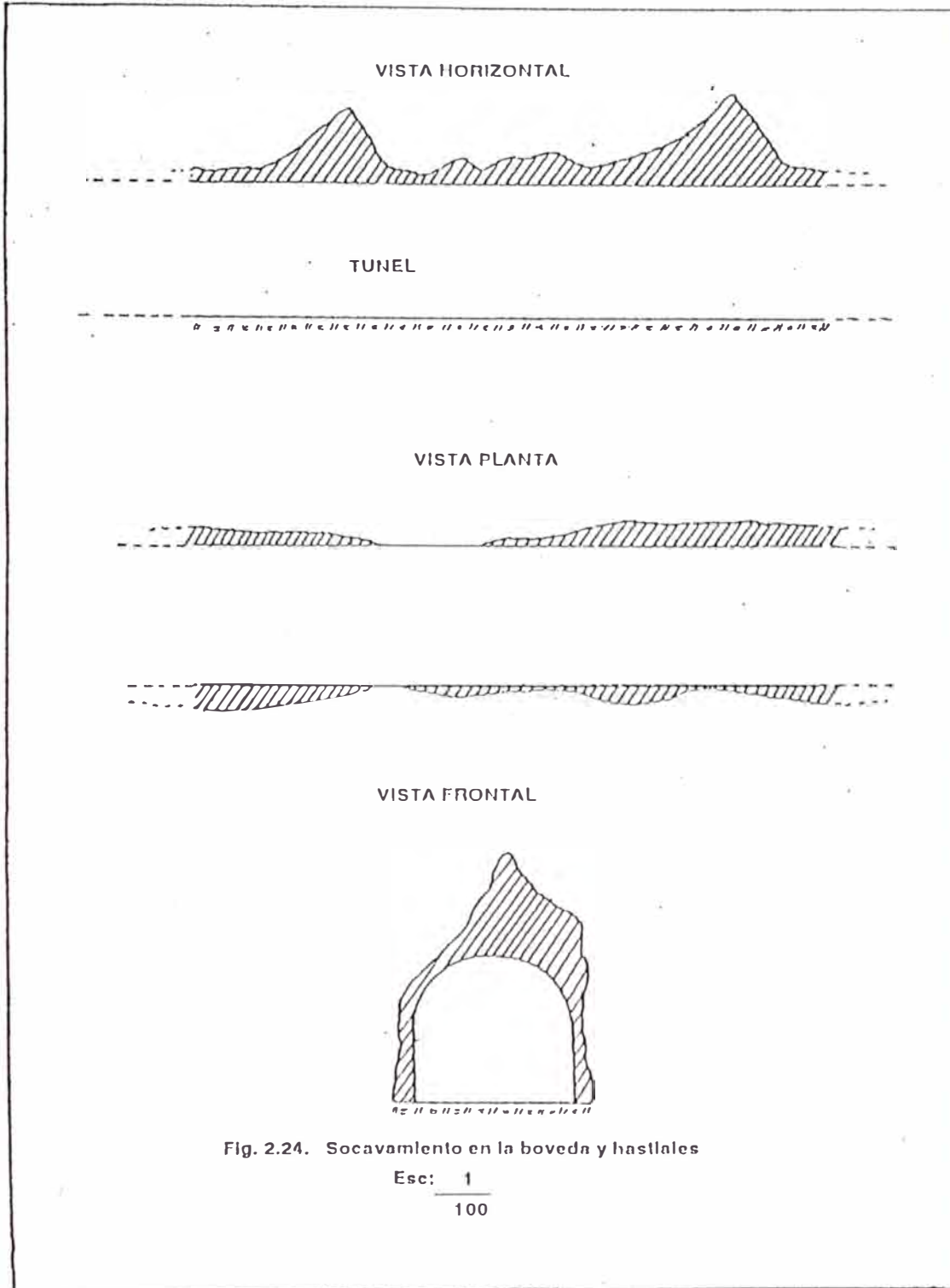
En los túneles de la Presa Yuracmayo han ocurrido varios casos de derrumbes, algunos de los cuales han llegado a tener hasta 12 m de realce. A continuación se trata la descripción de la excavación ocurrida en la galería de sondaje, ubicada en la margen derecha de la presa (FIG. 1.2), la misma que fue construida el año de 1991 con fines exploratorios de comprobación.

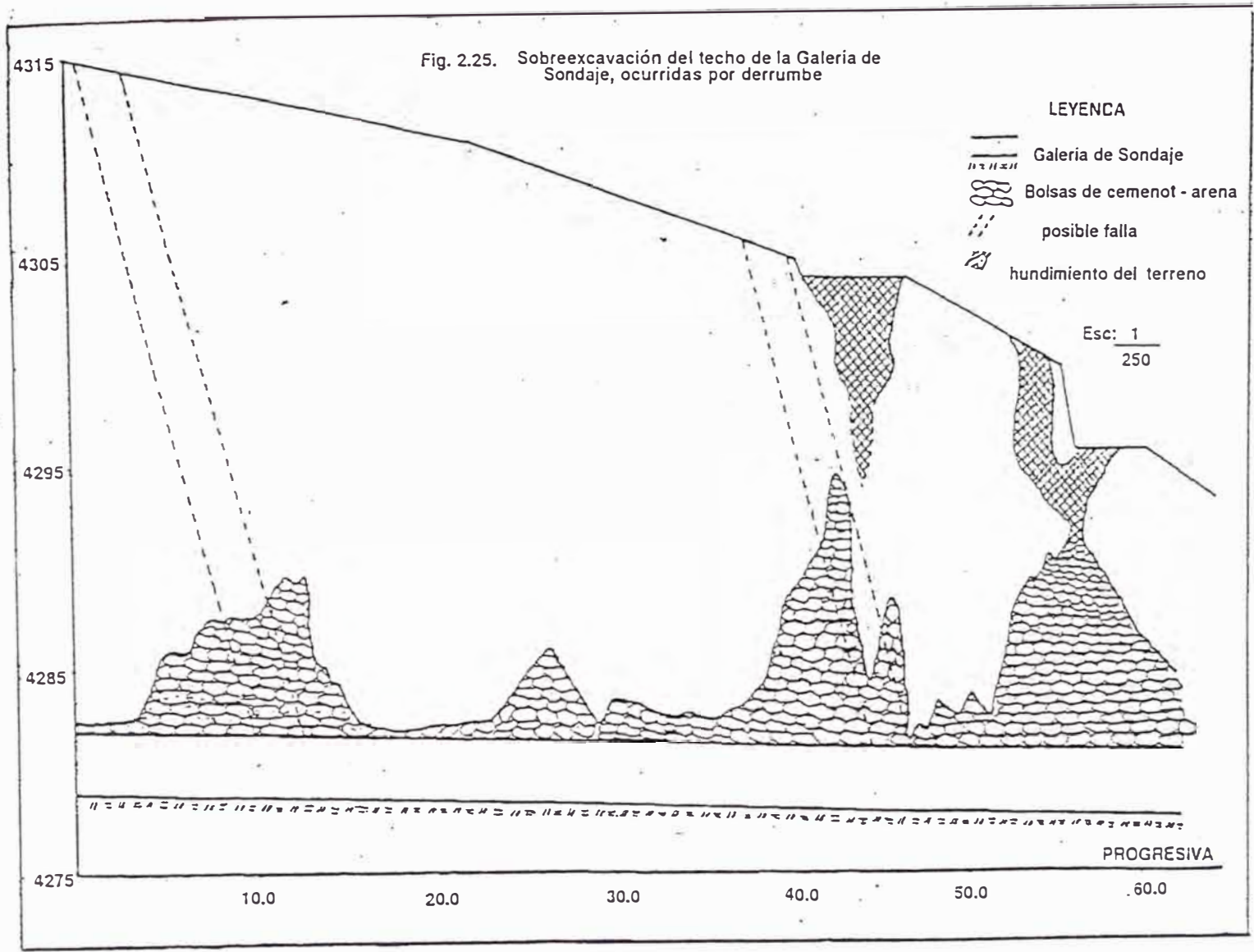
El derrumbe se originaron por dos fallas ubicadas en las progresivas 17,30 y 48,18 m aproximadamente desde la galería de acceso. El primero tuvo una sobre excavación máxima de 7,3 m y el segundo de 12,0 m, medidos a partir del techo de la galería (FIG. 2.25).

El material utilizado para poder estabilizar toda el área fue:

- cemento y arena en bolsas de polietileno.

cemento inyectado para rellenar los vacíos dejados por las bolsas de polietileno (255 TM).





La inyección se llevó a cabo en dos fases. La primera se realizó de la siguiente manera:

Una vez culminado el relleno con bolsas de polietileno, y culminada la aplicación del concreto lanzado, se realizaron perforaciones de 1" de diámetro, en 3 hileras, con máquinas neumáticas, de 3" de profundidad (a manera de tres bolillos). En cada hilera los taladros están separados 3 m uno con respecto del otro, ocurriendo lo mismo con la hilera central.

Una vez culminada la inyección en estos taladros se reperforaron con taladros de 5 pies para luego proceder a inyectarlos.

Estos taladros fueron a su vez reperforados nuevamente pero esta vez con barrenos de 8 pies, siendo posteriormente inyectados.

Culminada esta operación se programó la segunda fase, la cual constó de 3 taladros en las progresivas 13,5, 17 y 41, cuyas profundidades fueron 8, 8 y 14 m respectivamente, realizados con máquinas hidráulicas (perforaciones diamantinas) de diámetros mayores NCD o NXC, con un consumo total de 63,75 Tm de cemento.

Finiquitadas ambas fases el trabajo de relleno se da por concluido.

## PRESIONES DE INYECCION

En la primera fase la presión máxima utilizada fue de 3 Kg/cm<sup>2</sup> debido a la poca profundidad de los taladros mientras que en la segunda fase se utilizaron las siguientes presiones (en función de la profundidad) de rechazo:

Profundidad (m)	Presión (Kg/cm <sup>2</sup> )
0 - 2	1,5
2 - 4	3,0
4 - 6	4,0
6 - 8	5,0
> 8	6,0

## MEZCLA DE INYECCION

Las mezclas utilizadas son:

	MEZCLAS				CEMT (Kg)	AGUA Lt	AREN (Kg)	BENTONITA		VOL. TOT. Lt
	AGUA	CEMT	BENT	AREN				Lt	Kg	
m1	2	1	4%	--	42,5	74,0	--	11,0	1,7	98,6
			2%	--	42,5	77,3	--	8,2	1,3	99,1
m2	1	1	2%	--	85,0	74,8	--	11,0	1,7	112,9
m3	0,5	1	--	--	85,0	42,5	--	--	--	69,6
m4	1	1	--	1	42,5	42,5	42,5	--	--	71,3



Las mezclas  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_4$  se utilizaron en la primera fase mientras que las mezclas  $m_2$ ,  $m_3$  y  $m_4$  fueron empleadas durante la segunda fase.

#### **METODOLOGIA DE LA INYECCION**

El método de inyección que se aplicó en la primera etapa fue el de llegar a la presión de rechazo con caudal cero, mientras que para la segunda etapa se aplicó el siguiente diagrama de flujo adjunto.

#### **2.2.3. Técnicas en inyecciones de impermeabilización**

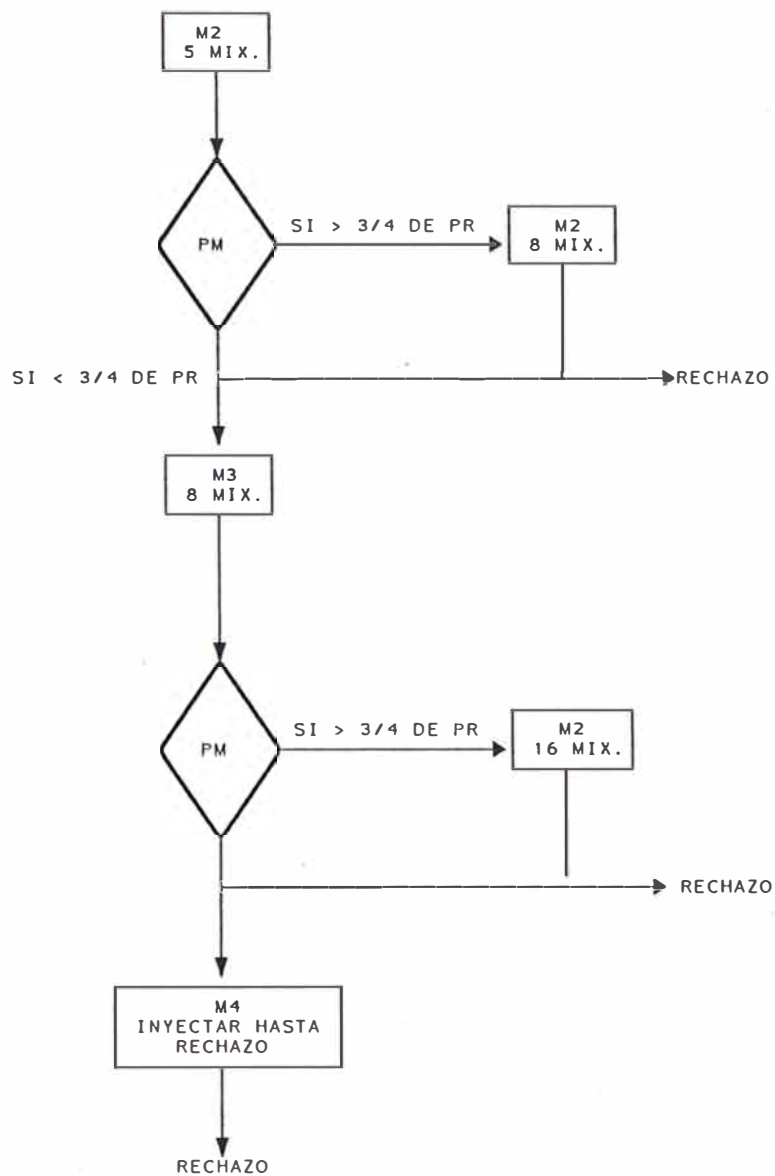
Actualmente existen diversas técnicas de inyección, unas más eficientes que otras, sin embargo todas en su debido momento dieron muy buenos resultados, es decir, cuando aparecieron eran lo más moderno, pero poco a poco quedaron obsoletas. Ello no quiere decir que no se sigan utilizando en ocasiones en las cuales las condiciones del medio a inyectar lo permitan.

Las técnicas de inyección más utilizan actualmente, son:ë

Con tubos de manguito, para taladros largos o con derrumbes.

Sin tubos de manguito, para taladros cortos, sin problemas de estabilidad de derrumbes y paredes relativamente lisas. Puede ser ascendente o descendente.

## DIAGRAMA DE FLUJO



DONDE : PM = PRESION MANOMETRICA  
 PR = PRESION DE RECHAZO

NOTA : PARA LLEGAR AL RECHAZO SE DEBE CONSIDERAR CAUDALES POR DEBAJO DE LOS 5 Lt/m.  
 SI SE LLEGA AL RECHAZO CON MORTERO COMPROBAR CON LECHADA 1:1 (M-2)

1 MIX : ES EL VOLUMEN TOTAL POR MEZCLA

**a. Equipo de inyección:** Dependiendo de la técnica de inyección a utilizar el equipo de inyección es el siguiente:

**a.1. Inyección con tubo de manguito:**

- Tubos de manguito o manchete: Son mangas de caucho de 2,25 pulgadas de diámetro interno y 2,50 pulgadas de diámetro exterior, con una longitud de 10 cm, que cubren un tubo PVC cada 50 cm, teniendo el tubo, en el tramo que cubre la manga de caucho, diez orificios de 3/8 pulgada de diámetro. El tubo PVC tiene 4,95 m (FOTO 2.4).

- Mezcladora: En ella se prepara la mezcla que se va a inyectar (FOTO 2.5a).

Batidora: La mezcla preparada pasa a la batidora para uniformizarla (FOTO 2.5b).

Bomba inyectora: Se encarga de bombear la mezcla al sondaje. La utilizada es de pistón, con una presión máxima de 80 bar. Se debe tener en cuenta que para caudales debajo de los 8 lt/seg la bomba ya no tiene la misma eficiencia (FOTO 2.6a).

Estabilizador de presión: Utilizado con bombas de pistón, su finalidad es limitar a un 5 % las oscilaciones producidas por la bomba (FOTO 2.6b)



2.4. Tubos de manguito o manchete

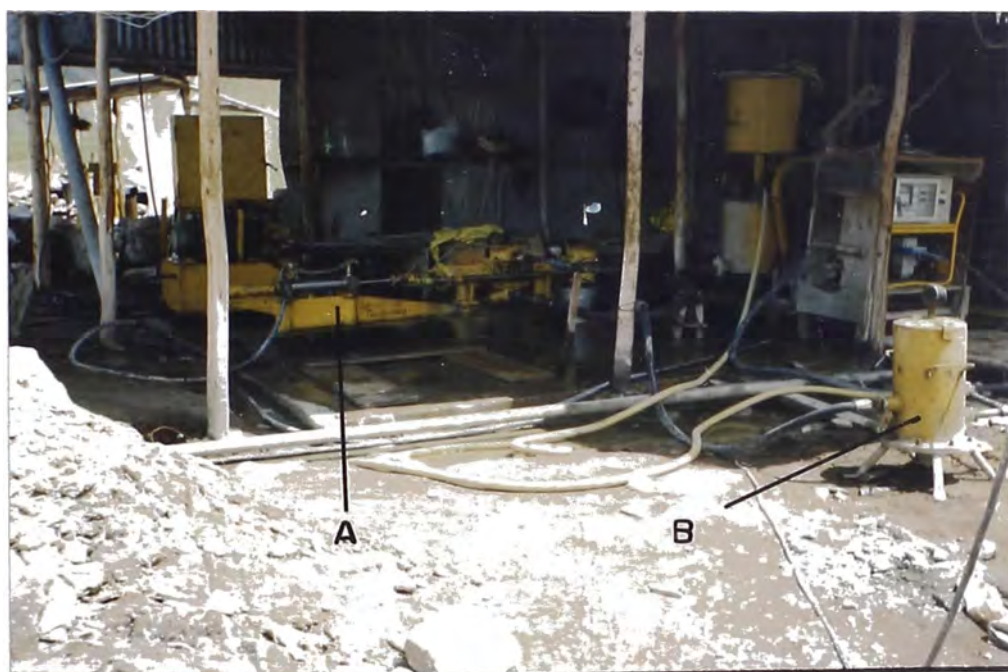


2.5 a Mezcladora  
b Batidora

Registrador: Este es opcional y es la última innovación en inyección. En él se registra la presión y el caudal de inyección. Tiene incorporado registradores gráficos y digitales que nos proporcionan lecturas de la presión y el caudal (FOTO 2.7).

Tubería de acero o galvanizada: (FOTO 2.8a) A través de ella se conduce la mezcla de la boca de la perforación hasta el obturador; va unida a la manguera que sale del registrador. Esta tubería posee diversos diámetros, dependiendo del tipo de obturador a emplear. Si el obturador es hidráulico (inflable) se utiliza una línea de 0,5 pulgadas, pero si el obturador es mecánico se utilizan dos líneas, una de 1 pulgada y otra de 0,5 pulgadas.

Obturadores: Existen varios tipos de obturadores, de los cuales los más importantes son los mecánicos y los hidráulicos; éstos, a su vez, pueden ser simples o dobles. Los obturadores mecánicos llevan un jebe de caucho blando el cual se hincha al ser presionado desde su parte inferior contra una huacha ubicada en la parte superior de dicho jebe. El obturador hidráulico (FOTO 2.8b) posee un jebe inflable que se hincha al introducirse agua, aire o aceite a presión. En ambos casos los



2.6 a Bomba de inyección  
b Estabilizador de Presión

obturadores simples llevan un sólo jebe y los dobles llevan dos jebes (FOTOS 2.8c).

Bomba de hinchado: Se utiliza cuando el obturador es hidráulico. Es una bomba hidráulica unida al obturador mediante un flexible de hinchado (alambre) de 0,8 cm de diámetro externo y 0,48 cm de diámetro interno; resiste presiones de hasta 140 Kg/cm<sup>2</sup>. Como accesorio tiene un manómetro que mide la presión del obturador.

**a.2. Inyección sin tubo de manguito:** Para la inyección ascendente o descendente el equipo es el mismo y similar a la inyección con tubos de manguito, es decir se utiliza:

- Mezcladora.
- Batidora.
- Bomba inyectora.
- Estabilizador de presión.
- Registrador.
- Tubería de acero o galvanizada.

Obturador: Los obturadores que se utilizan pueden ser hidráulicos o mecánicos, pero de mayor diámetro que en el caso de la inyección a través de tubería de manchete.ë





### 2.7 Registrador Automático

- |                        |   |                      |
|------------------------|---|----------------------|
| a. Registrador gráfico | b. Registrador Digital                        | c. Marcador de aguja |
| a.1) de presión        | b.1) de Caudal                                | c.1) de presión      |
| a.2) de Caudal         | b.2) De Caudal acumulado durante la inyección | c.2) de caudal       |

- Bomba de hinchado.

**b. Diseño y metodología de construcción de una pantalla de inyección:**

**b.1. Inyección con tubos de manguito:** La metodología a aplicar es la siguiente:

Luego de culminada la perforación del sondeo éste se lava durante 10 minutos para dejar limpio el sondeo de arena y fragmentos de roca (FIG. 2.26a).

- Se procede a instalar los tubos de manguito y retirar el revestimiento (FIG. 2.26b).

A continuación se inyecta vaina (mezcla de cemento bentonita y agua) para unir las paredes del pozo con el tubo de manguitos (espacio anular). La inyección de vaina se hace cada 6 m, con un volumen máximo de 2000 lt por tramo. La vaina tiene las siguientes especificaciones: para 100 lt de vaina, 17 Kg de bentonita más 42,5 Kg de cemento (Fig 2.26c).

Al inicio de la inyección se conecta el obturador con la tubería. El flexible de hinchado se conecta en la parte superior. El tubo así instalado se baja por el tubo de manguitos hasta la profundidad que se desea inyectar (FIG. 2.26d).



- 2.8 Obturadores hidráulicos
- a. Tubería de Inyección
  - b. obturador doble
  - c. obturador simple

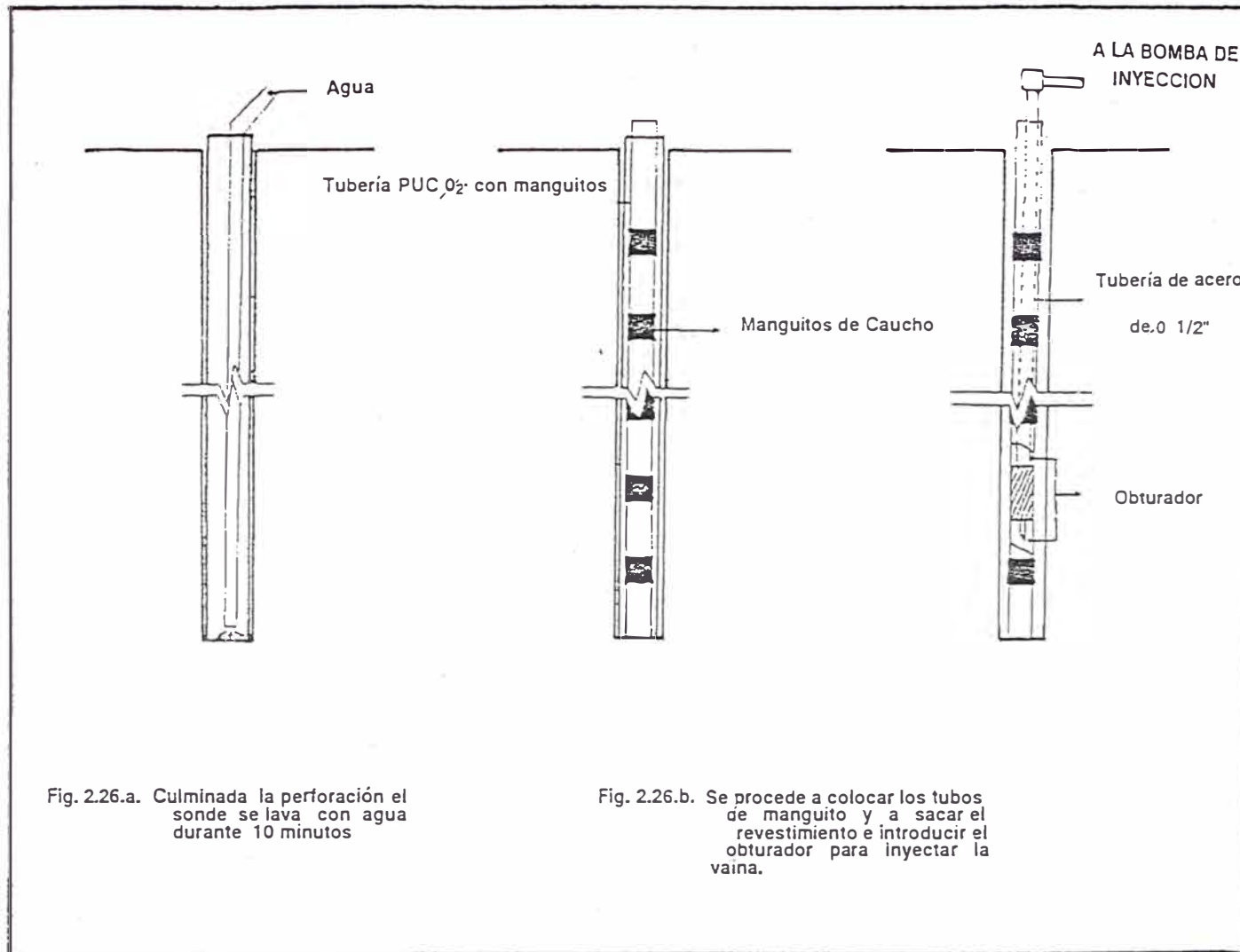


Fig. 2.26.a. Culminada la perforación el sonde se lava con agua durante 10 minutos

Fig. 2.26.b. Se procede a colocar los tubos de manguito y a sacar el revestimiento e introducir el obturador para inyectar la vaina.

Para iniciar la inyección se necesita que los manguitos estén abiertos, es decir, abrir el manguito con una determinada presión para que la mezcla pueda pasar por los huecos y salir a través de la abertura que hay entre el manguito y el tubo PVC. El manguito se abre inyectando agua a una presión máxima de  $60 \text{ Kg/cm}^2$ . Ellos se encuentran cerrados debido a la presión que ejerce la vaina sobre el tubo PVC. La presión del agua produce que la vaina se fracture permitiendo el posterior paso de la mezcla. Para realizar esta operación es necesario utilizar el obturador doble (FIG. 2.27).

Una vez preparada la mezcla que se va a inyectar, ésta pasa primero por la bomba, luego al estabilizador, llegando al registrador automático del cual se toman datos de volumen y presión cada 5 minutos; la mezcla finalmente llega al obturador para luego penetrar en el medio que se está inyectando.

Se inyecta hasta que se llegue a la presión de rechazo o volumen límite. En una inyección normal se puede realizar con obturador doble o simple cada 1 ó 0,5 m para el primer y segundo caso respectivamente.

**b.2. Inyección sin tubo de manguito:** La metodología de la inyección depende de si ésta es

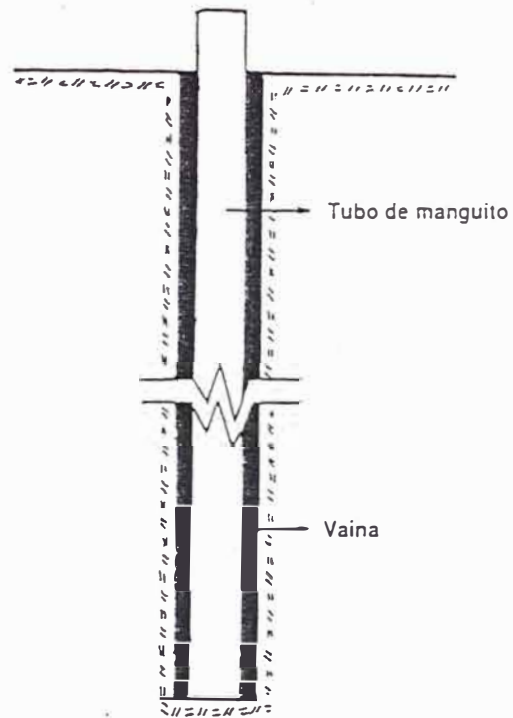


Fig. 2.26.c. Se inyecta la Vaina para que sostenga al tubo de Manguito

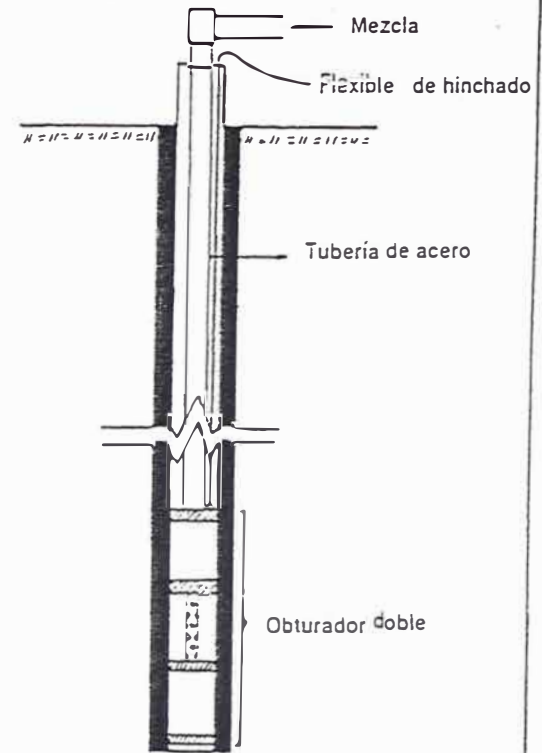


Fig. 2.26.d. Instalación del Equipo de inyección

descendente o ascendente. En el primer caso los pasos a seguir son:

- Se perfora un cierto tramo, se para la perforación y se procede a instalar el equipo de inyección (FIG. 2.28a).
- Se obtura el tramo a inyectar (FIG. 2.28a).
- Se procede a inyectar.
- Terminada la inyección se espera a que la mezcla fragüe, se reperfora el tramo inyectado y se perfora otro (FIG. 2.28b).
- Se repite el mismo procedimiento hasta llegar a la profundidad necesaria.

Si la inyección es ascendente la metodología de inyección es similar a la aplicada con tubos de manguito. La diferencia radica en que se usan obturadores de mayor diámetro y no se aplican los pasos en los cuales intervenga el tubo de manguito (inyección de vaina, ruptura del manguito, etc.).

#### **2.2.4. Control de inyecciones**

Este control es una de las partes más delicadas y difíciles de efectuar. El método más seguro de obtener datos reales de la inyección consiste en esperar a que el trabajo de inyección concluya para posteriormente hacer perforaciones con recuperación de testigos en

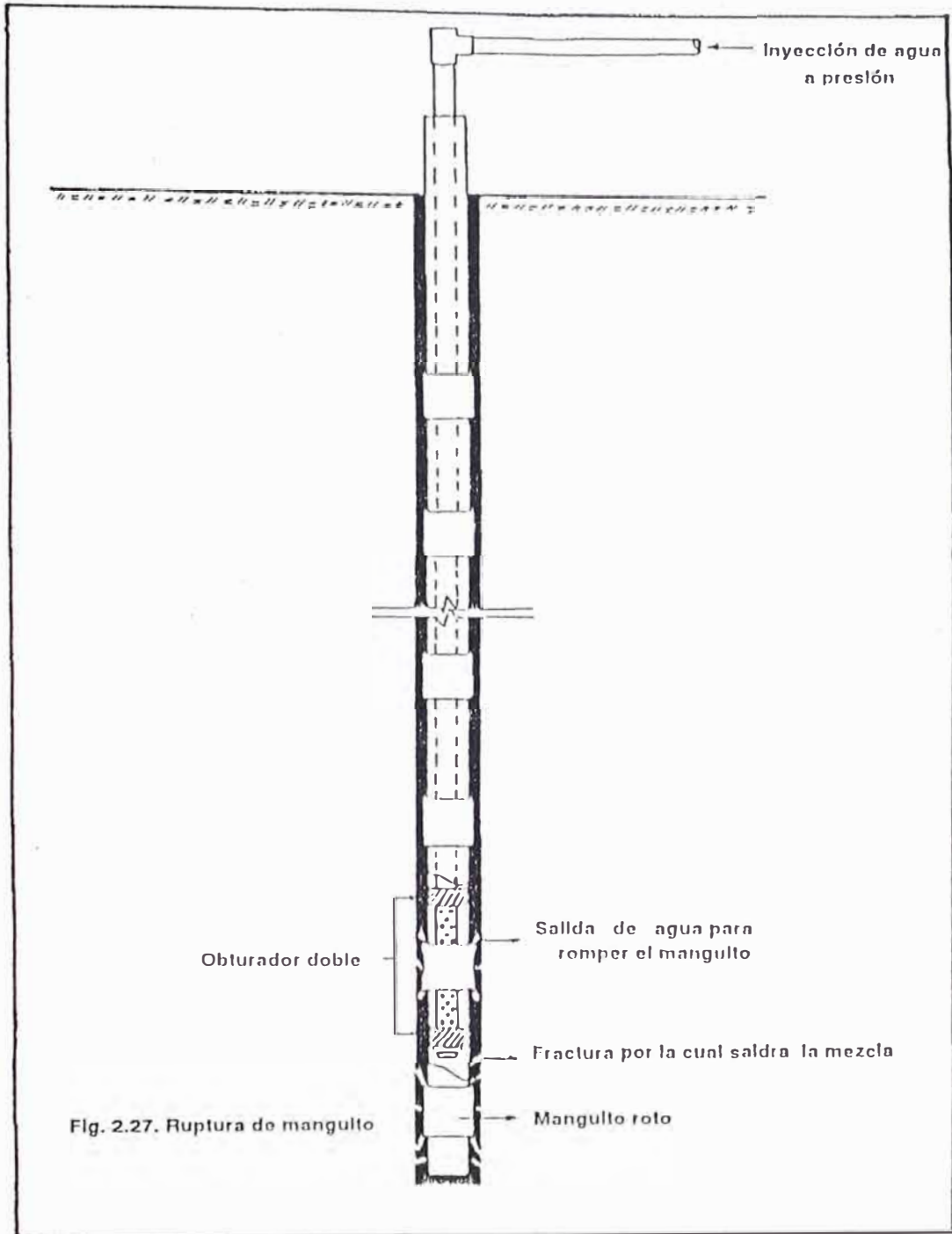


Fig. 2.27. Ruptura de mangullo



zonas claves. Cabe mencionar que se hacen pruebas de control de la inyección mientras se efectúa ésta, pero los resultados no son confiables (Cambefort H. 1968)

Hay que distinguir dos tipos de controles, uno local y otro global. El primero arroja resultados hasta cierto punto deficientes ya que no todas las capas se hallan inyectadas en forma uniforme, más bien se trata de un medio heterogéneo al cual se le debe realizar un control.

Por ejemplo se da el caso que en un mismo taladro a una profundidad de 23 m da una permeabilidad de 10 darcys y a 28,5 m da 0,1 darcy, mientras que un segundo taladro perforado a 2,0 m del anterior permite obtener 1 darcy a 23 m y 30 darcys a 28,5 m. La heterogeneidad del tratamiento es claramente observable y, sin embargo, la pantalla tiene una permeabilidad global de 0,4 darcy (Cambefort, 1968).

**a. Controles locales:** Estos controles se realizan a partir de taladros de inyección, del mortero inyectado, de una combinación de ambos o desde la superficie del macizo inyectado. Los principales métodos que se utilizan en controles locales son:

**a.1. Ensayos de agua:** Se efectúan en perforaciones rotativas hechas desde superficie. Si la cantidad de ensayos es muy numerosa se puede llegar a determinar una permeabilidad media, pero se debe tener en cuenta el costo de estos

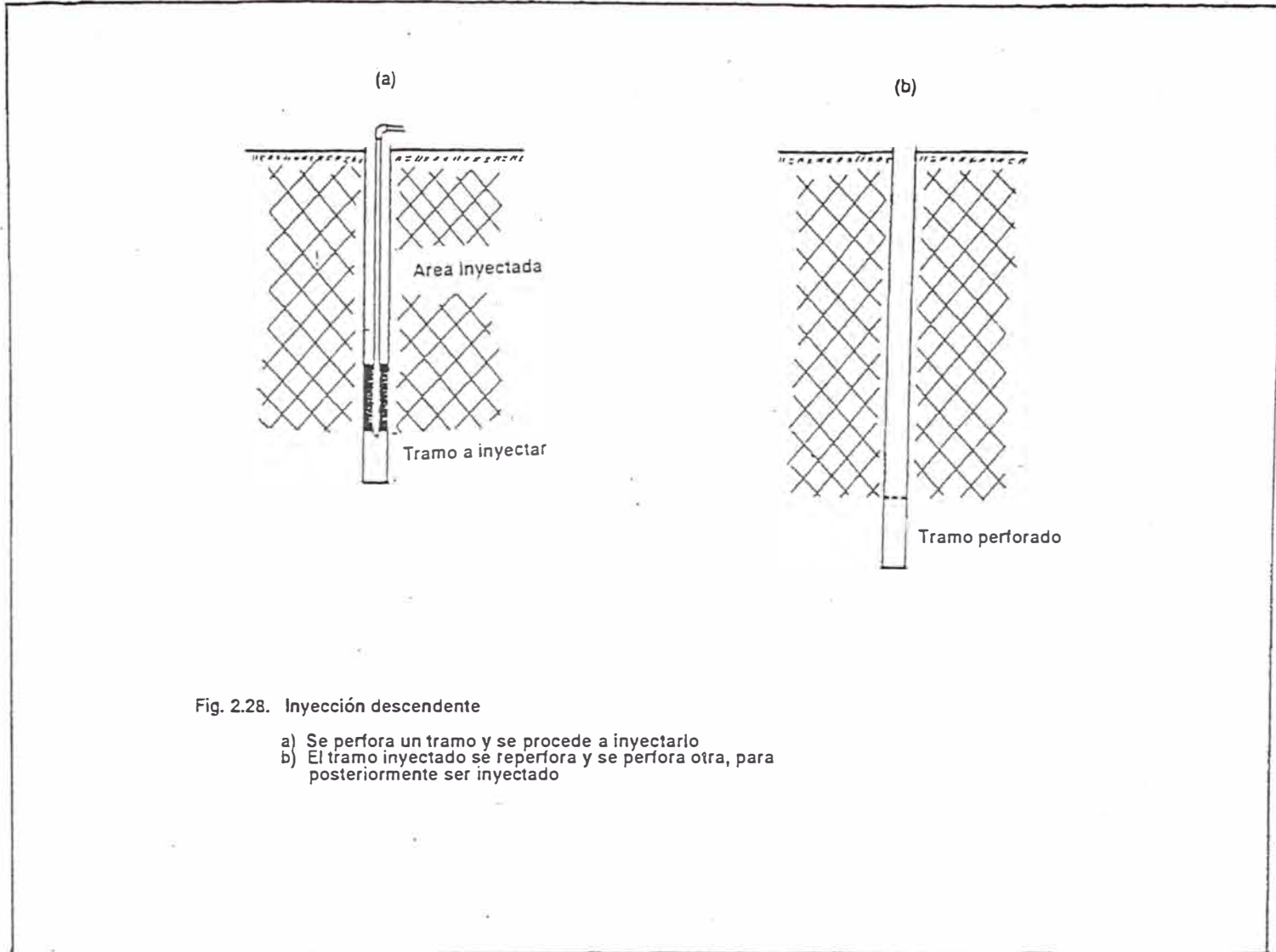


Fig. 2.28. Inyección descendente

- a) Se perfora un tramo y se procede a inyectarlo
- b) El tramo inyectado se re-perfora y se perfora otra, para posteriormente ser inyectado

ensayos. Los ensayos a realizar pueden ser del tipo Lefranc o Lugeon.

Como se puede deducir, este tipo de control se hace sobre trabajos ya concluidos. No es posible utilizarlos durante la ejecución o avance de la inyección.

**a.2. Coloración de las mezclas:** Es muy difícil observar un mortero inyectado en las fisuras finas del medio tratado, aunque el color de la mezcla sea diferente al de la roca, es por ello que sólo los fuertes espesores de lechada son observados en los testigos de perforación efectuados posteriormente a la inyección.

Existen en el mercado muchos productos que se utilizan para colorear morteros o lechadas. Por ejemplo para el control de lechadas con silicato es frecuente el uso de fenoltaleina; ésta se aplica al testigo y no a la mezcla o a la masa, como veremos a continuación.

Para colorear la masa se utilizan colorantes tales como la fluoresceína, eosina, rodamina, etc. Estos productos, además de su coloración, son fluorescentes y son observados con luz ultravioleta. Se pueden utilizar también polvos minerales a base de óxido férrico (rojo o anaranjado), sales de cromo (verdes) o sales de cobre (azules).

Los colorantes descritos anteriormente no suelen ser muy claros, por lo que se utilizan normalmente colorantes de marcado de la mezcla, los cuales permiten reconocer el mortero de entre los sedimentos de perforación de un taladro de inyección. Con este método el mortero es reconocido sin necesidad de testigos. En este tipo de coloración se utiliza mucho la alizarina o los organoles, que son insolubles en agua pero solubles en disolventes orgánicos tales como tricloretilina o bencina. Estos pueden descubrirse con facilidad de entre los sedimentos de la perforación, incluso se puede determinar el porcentaje presente en aquellos sedimentos.

**a.3. Trazadores radiactivos:** Se utilizan en lugar de los colorantes. Las condiciones que deben cumplir estos elementos radiactivos son:

No debe modificar las características de la mezcla.

- Debe tener un corto tiempo de duración.
- Debe ser fácilmente detectable.

Para descubrirse se utiliza un contador Geiger que se hace descender por la perforación. Se podrá con ello determinar las zonas de mayor o menor inyección.

**a.4. Resistividad eléctrica:** Esta se basa en que la resistividad de los morteros son diferentes a la del agua, lo cual permite su detección, ya sea desde superficie o desde una perforación (sondeos eléctricos). El problema de este método es la interpretación la cual se hace muy difícil; por ejemplo, no se puede determinar con exactitud las zonas que necesitan una mayor inyección. Esto ocurre si el mortero no ha llegado a superficie; pero si el mortero llega a superficie ocurre lo contrario. También es importante mencionar que cuando menor es la resistividad mayor es el volumen inyectado.

**b. Control Global:** Consiste en determinar los niveles piezométricos en lugares escogidos antes y después de la construcción de la presa (R. Chadeisson, 1962). Una pantalla de mayor espesor dejará pasar menos agua que una de menor espesor.

Sea, por ejemplo, una pantalla estanca (FIG. 2.29); en ella se han determinado los niveles piezométricos A, B, C, etc. Tendremos:

$$K_1 S_1 (A-B)/L = K S (E_1 - E_2)/e = K_2 S_2 (C-D)/m \dots (1)$$

Después de concluida la obra se tiene:

$$K_1 S_1 (A'-B')/L = K' S (E'_1 - E'_2)/e = K_2 S_2 (C'-D')/m \dots (2)$$

Dividiendo (1) entre (2) tendremos:

$$R = \frac{K}{K'} = \frac{A - B}{A' - B'} * \frac{E'_1 - E'_2}{E_1 - E_2} = \frac{C - D}{C' - D'} * \frac{E'_1 - E'_2}{E_1 - E_2}$$

R define el cociente de permeabilidad media, a la altura de la pantalla; este es un coeficiente de calidad y cuando más elevado sea éste mejor habrá sido el tratamiento.

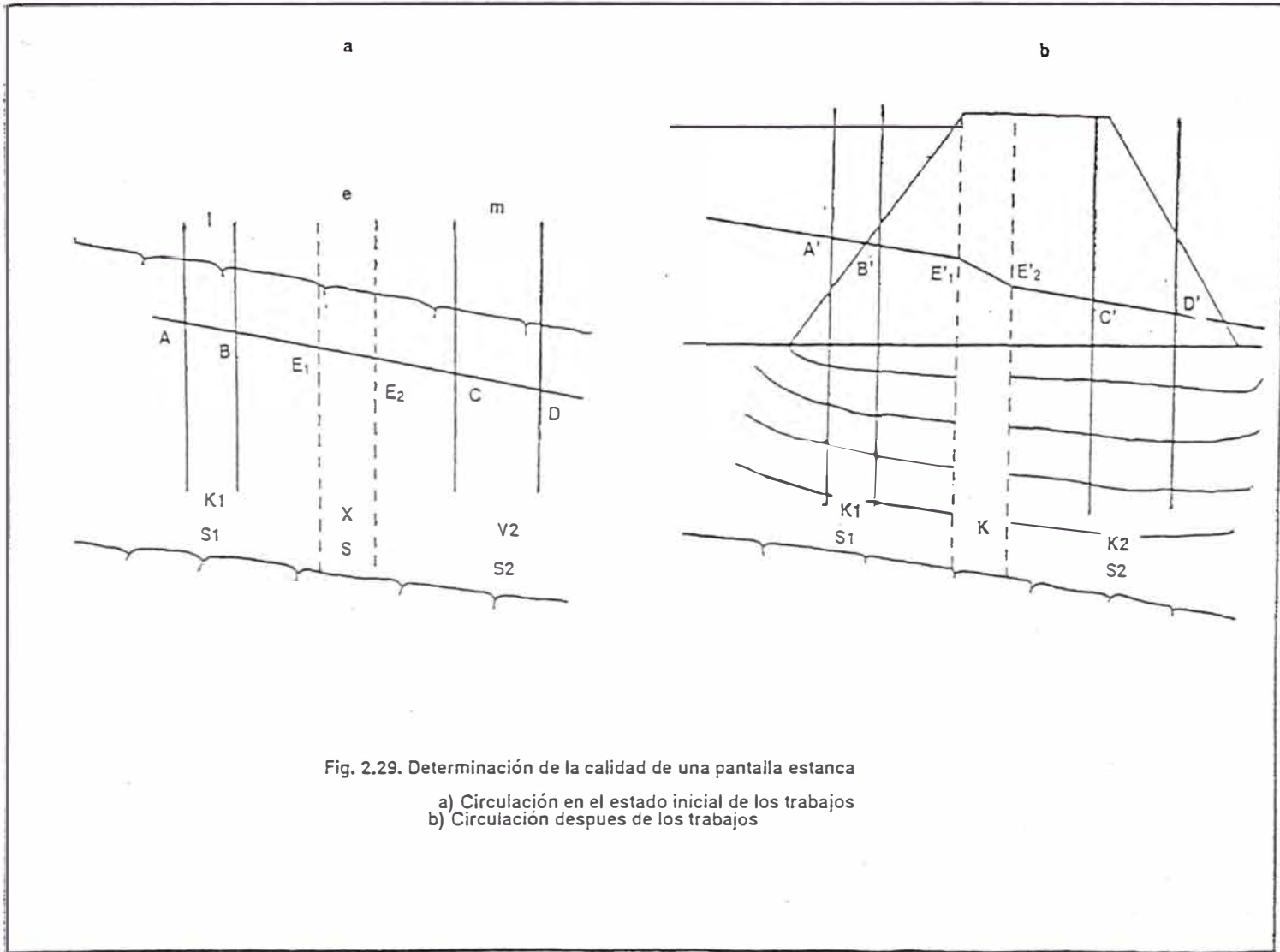


Fig. 2.29. Determinación de la calidad de una pantalla estanca

- a) Circulación en el estado inicial de los trabajos
- b) Circulación despues de los trabajos

### **3. INYECCION DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION DE LA PRESA YURACMAYO EN LABORES SUBTERRANEAS (TRAMO A<sub>350</sub> - A<sub>404</sub>)**

La ubicación de este tramo dentro del eje de la pantalla de inyecciones es en el estribo derecho, con progresiva que va del punto A350 al A404, como se puede apreciar en la Fig. 1.2, el cual a su vez contiene las obras subterráneas efectuadas en la margen derecha.

Este tramo está constituido enteramente de roca, por lo que el diseño está orientado al relleno de fracturas. Cabe mencionar que en este mismo tramo se han efectuado trabajos de inyección desde superficie, los mismos que se hallan a 3 m del techo de la galería en la cual se efectuó el trabajo de campo del presente estudio. Los procedimientos y descripción de las inyecciones, así como los tipos de mezclas, serán desarrollados en los items siguientes.

#### **3.1. CONDICIONES GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS DEL MACIZO ROCOSO**

Es de vital importancia conocer la geología y las características geotécnicas del macizo a inyectar debido



a que nos proporcionan datos valiosos que posteriormente serán utilizados para definir los tramos más delicados y de una mayor o menor inyección. Para la obtención de estos datos hacemos uso de sondajes exploratorios, excavación de túneles, calicatas, geosísmica, etc.

Es importante conocer la geología porque ella nos determina zonas de falla, las cuales son muy peligrosas al efectuarse la inyección. Como se sabe, la mezcla siempre tiende a fluir por zonas de fractura y en una falla, al ser un tipo de fractura, podría darse el caso que la lechada fugue por esta zona de debilidad y llegue a la superficie, necesitándose, por lo tanto, un tratamiento especial. También puede darse el caso que la roca sea una arenisca muy porosa lo cual determinaría que el tratamiento que se le de no sea sólo de relleno de fracturas, sino también de relleno de vacíos lo que nos conlleva a elegir otro método de inyección y tipo de mezcla, dependiendo, claro está, de las permeabilidades.

En el caso de las características geotécnicas, éstas nos determinan el grado de fracturamiento, alteración, dureza, etc., de una roca. La experiencia ha demostrado que a un mayor fracturamiento el consumo de cemento será mayor, siempre que las fracturas sean abiertas y con poco o ningún relleno. La alteración de una roca es importante cuando se trata de materiales que contengan sulfatos u otra composición que altere el cemento tipo Portland I ó II, que son los más usados es este trabajo, originando el uso de un cemento especial como tipo V o

puzolánico. Por otra parte es importante tener en cuenta la dureza, especialmente cuando se trata de materiales poco consolidados como aluviones, y morrenas jóvenes tufos volcánicos o rocas poco densas, las que necesitan poca presión de inyección. De inyectarse con presiones altas ocurriría el fenómeno de contrapresión (ver ítem 2.1.4) fracturando aún más el material y por ende aumentando su permeabilidad.

### **3.1.1. Geología del tramo de estudio**

- a. Geomorfología:** La geomorfología de la zona es ondulante, con una pendiente promedio de 40%, aumentando a medida que se asciende. El modelado de la superficie ha sido realizado por la acción de los glaciares, gravedad, lluvia, etc., ya que en el área se encuentran depósitos fluvioglaciares, coluviales, etc.
  
- b. Litología:** La roca predominante ha sido definida como una toba traquítica a riolítica; presenta una coloración rojo brunácea correspondiente a la Formación Carlos Francisco. Para el presente trabajo se envió al laboratorio de petromineralogía de la Universidad Nacional de Ingeniería una muestra para su estudio, determinándose que la roca es un tufo dacítico a riolítico. Cabe mencionar que las perforaciones de investigación han cortado algunos sills porfidoriolíticos.

**c. Geología estructural:** En el tramo de estudio la principal estructura es un sinclinal, el cual se ha determinado durante la construcción del túnel; la pseudoestratificación es N 58° W y buzamiento de 75° NE en el flanco izquierdo, N 55° W y buzamiento de 45° SW en el flanco derecho. Este sinclinal se halla en el tufo dacítico a riodacítico. Como se mencionó anteriormente, esta roca se halla hasta la progresiva 0+73,5 en la misma que existe un cambio de litología, teniéndose una pseudoestratificación con N 30° W de rumbo y 34° SW de buzamiento. Otras estructuras importantes son las fallas siguientes:

	RUMBO	BUZAM.	PROGR.
F1	N 30° W	40° SW	0+09,5
F2	N 35° W	40° SW	0+25,0
F3	N 40° W	35° SW	0+40,0
F4	N 42° W	36° SW	0+50,0
F5	N 30° W	34° SW	0+75.5

También se aprecian tres sistemas principales de fracturamiento, siendo los siguientes (en orden de importancia):

S 60° W	38°-79° NW
N 55° W	78° NE
N 60° W	42° SW

Para un mejor detalle ver la Sección Longitudinal de la Galería de Investigación (plano 3.1).

### **3.1.2. Características geomecánicas de la roca**

**a. En superficie:** Muy comúnmente, la roca atravesada por las perforaciones y la galería de margen derecha se encuentran en estado de fragmentación bastante desarrollado, con abundancia de discontinuidades de orientaciones variadas y buzamientos generalmente fuertes, de modo que la recuperación de testigos cilíndricos es excepcional. Hasta profundidades de hasta 20 m la descomposición de la roca es extrema, con abundante relleno de fisuras de composición arcillosa y areno-limosa; ello sugiere depósitos secundarios por aguas infiltradas desde superficie. Una parte del material de relleno proviene de la descomposición propia de la roca. Un fracturamiento tan generalizado como el de la zona superficial del macizo rocoso podría haberse originado por esfuerzos considerables aplicados por el glaciar (glaciotectonismo), por el papel del hielo y las aguas de fusión (Steiger R., Moril E., & Farfán M., 1983).

#### **b. En labores subterráneas:**

La roca en la galería de investigación se halla normalmente fracturada con un  $J_v$  igual a 29.0 en las zonas menos fracturadas. Se hallan tres áreas críticas en las que el fracturamiento es demasiado alto con  $J_v$

= 5, estas áreas corresponden a las zonas de falla. Durante la construcción del tunel en dichas áreas ha sido necesario un trabajo de sostenimiento. El cual se detalla en el ítem siguiente. La roca en las áreas críticas tiene valores de alteración que van de  $a_3$  a  $a_4$ , de dureza van de  $d_3$  a  $d_4$  y de fracturamiento van de  $f_3$  a  $f_5$ , como se aprecia en el Plano 3.2. El relleno normalmente es de arcilla y panizo. Las fracturas tienen una potencia promedio de 3 a 10 cm, pudiendo llegar a 30 cm con relleno de panizo. Se realizó una estación de línea de detalle en el tramo 0 + 27 cuyos datos se hallan en la hoja adjunta. Se puede apreciar que los sistemas principales de discontinuidad son:

	Rum	Buz
-	N 31° W	46° SW.
-	N 45° W	78° NE.
-	S 75° W	81° NW.

El ploteo de puntos en la red de Smith y su correspondiente análisis determinaron la existencia de problemas geotécnicos del tipo planar, que se resolvió con la instalación de cimbras y planchas acanaladas metálicas.



### 3.1.3. Tipo de excavación y soporte del túnel

La excavación se realizó mediante el método de perforación y voladura con máquinas neumáticas. Los diámetros de los taladros varían de 38-40 mm con un avance por disparo de 2.21 mt.

Las zonas críticas de sostenimiento fueron estabilizadas con marcciantis, cerchas metálicas y planchas, mientras que en las zonas con menor riesgo se les colocó una capa de concreto lanzado (gunitado) y en zonas ligeramente riesgosas se instaló mallas metálicas. En el plano 3.2 se detalla el tipo de sostenimiento utilizado en cada caso. En la progresiva 0+000 al 0+016, 0+027 al 0+037.5 y 0+052.5 se colocó cimbras, planchas acanaladas y marcciantis. En la progresiva 0+016 a la 0+027 se colocó malla metálica y concreto lanzado. En los tramos 0+037.5 a 0+41.5 y 0+052.5 al 0+067 solo se le estabilizó con concreto lanzado (shocrete)

Los parámetros tomados para su diseño son:

- Sección considerada: 3.10 x 3.10 m.
- Longitud del taladro: 2.40 m.
- Eficiencia de la voladura : 92%

Avance por disparo :  $2.4 \times 0.92 = 2.21$  mt.

Diámetro del taladro : 38-40 mm.

Diámetro del taladro de alivio: 44 - 51 mm.

Cantidad de taladros alivio (2)

Cargados (38)

Los explosivos utilizados fueron los siguientes:

- Dinamita de 1.1/8 x 7" con potencia de 70% - 75% para arranques y ayudas.

Dinamita de 1. 1/8" x 7" de menor potencia para el resto de los taladros sin considerar el contenido.

- Dinamita de 7/8" x 7" de baja velocidad de detonación en el contorno final con el proposito de efectuar una voladura amortiguada.

- Factor de potencia estimada 2.3 - 2.8 Kg/m<sup>3</sup>.

### **3.2. INVESTIGACIONES DEFINITIVAS REALIZADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO**

La recopilación de datos se realizó durante la ejecución de los trabajos de perforación e inyección. Estos datos nos darán luz para las conclusiones iniciales de las mezclas y tipos de inyección que se deben de aplicar.

#### **3.2.1. Metodología de la toma de datos**

La información captada se efectuó durante los meses de marzo setiembre de 1993, tiempo que duraron los trabajos de perforación e inyección. La toma de datos puede dividirse en dos partes:

##### **a. Datos obtenidos de las perforaciones exploratorias:**

De estas pruebas se obtuvo la permeabilidad de la roca, litología, RQD, etc. Desde galería se efectuaron dos perforaciones con fines exploratorios, mientras que desde superficie fueron un total de cuatro los pozos perforados con el mismo fin. Las pruebas de permeabilidad (Lugeon o Lefranc), se



ejecutaron cada 3 m y en casos excepcionales cada 2 ó 1,5 m

- b. Datos obtenidos de las inyecciones de impermeabilización:** Los datos fueron captados a medida que se realizaban los trabajos de inyección. El punto más importante fue determinar el volumen de inyección por metro lineal, según la categoría de los agujeros, así como el volumen final inyectado en cada taladro. Estos datos serán utilizados en el siguiente capítulo para determinar las recomendaciones correspondientes al presente trabajo.

Los datos obtenidos son llevados a una sección longitudinal de la galería de investigación, en la que se han graficado survas isovaloricas, a partir de las cuales se harán las conclusiones y recomendaciones respectivas.

### **3.2.2. Investigaciones con perforaciones diamantinas**

- a. Litología:** El presente ítem se ha desarrollado anteriormente, por lo que he creído conveniente no repetirlo (VER ITEM 3.1.1.).
- b. Ensayos de permeabilidad:** Se perforaron dos sondeos exploratorios desde interior túnel, uno ubicado en la cámara de compuertas y el otro en la Galería de Investigación, Mientras que desde superficie se realizarán cuatro taladros exploratorios, denominados PC1, A2, A2' y A1, que corresponden a las progresivas

A<sub>307</sub> , A<sub>362</sub>, A<sub>362.5</sub> Y A<sub>368</sub> respectivamente, los datos de permeabilidad se hallan en el Cuadro 3.1

**c. Valores de RQD:**

Los valores de RQD de la roca se han obtenido de los testigos de perforación utilizando la fórmula siguiente:

$$RQD = \frac{\text{Longitud de los trozos } > \text{ de } 10 \text{ cm}}{\text{Longitud de la corrida}}$$

Los sondeos de los cuales se han podido determinar los datos son los siguientes:

- A<sub>2</sub> la profundidad de 46.0 hasta 80 mt.
- A<sub>1</sub> la profundidad de 56.0 hasta 80 mt.
- PC<sub>1</sub> la profundidad de 52.0 hasta 125 mt.
- AS<sub>0</sub> la profundidad de 0.00 hasta 46.0 mt.
- A<sub>2</sub>, la profundidad de 50.0 hasta 130 mt.
- D<sub>37</sub> la profundidad de 3.0 hasta 58.70 mt.

El taladro AS<sub>0</sub> se ubica en la galería de investigación y el D<sub>37</sub> en la cámara de compuertas.

Los resultados se muestran en los siguientes cuadros:

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

A - 2"

COTA = 4321.48/INCL. = 25° / PROG=362

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
382.13	4272.88	16.88
383.58	4269.37	154.55
384.46	4267.24	34.99
386.00	4263.78	65.00
387.40	4260.13	35.82
388.33	4257.92	164.70
389.92	4254.08	48.46
391.56	4259.11	22.18
393.13	4246.32	5.82
394.58	4242.80	2.93
396.25	4238.80	10.89
397.78	4235.10	10.00
399.69	4230.50	15.91
401.61	4225.86	22.12
403.94	4220.22	45.10
407.77	4210.98	49.77
409.30	4207.30	2.93
411.17	4202.80	22.40

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

A - 1"

COTA= 4334.72/INCL= VERT /PROG.= 386

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
386.0	4276.72	1154.55
386.0	4273.87	314.55
386.0	4270.87	23.36
386.0	67.00	1181.82
386.0	4264.87	2.45
386.0	4267.87	2.79
386.0	4270.87	17.91
386.0	4257.72	34.10
386.0	4154.87	23.30

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

A<sub>5</sub> - 404

COTA= 4279.65/INCL = VERT/ PROG= 404

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
404	4273.40	140.18
404	4270.40	745.76
404	4268.15	321.31
404	4265.15	265.01
404	4262.15	131.59
404	4259.15	329.85
404	4256.15	0.008
404	4253.15	353.03
404	4250.15	2.47
404	4247.15	1.20
404	4244.15	77.88
404	4241.15	67.07
404	4238.15	36.57
404	4235.15	6.74

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

PC - 1

INCLINACION=33°      PROG= 307.00

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
333.18	4262.35	2.42
335.12	4258.96	13.64
336.23	4257.01	4.27
338.88	4252.36	0.93
339.95	4250.50	7.03
341.43	4247.90	2.69
343.17	4244.84	22.40
345.15	4241.37	104.54
346.88	4238.33	22.38
349.86	4233.12	128.18
351.09	4230.95	83.82
353.08	4227.50	7.62
356.30	4121.83	13.89
359.40	4116.40	39.00
362.24	4211.41	1.63
364.00	4208.40	1.79
365.96	4204.90	3.64
367.94	4201.42	1.76

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

D - 37

COTA=4278.5 INCLI=VERTICAL PROG=354.3

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
354.5	4272.6	2.34
354.5	4269.9	6.04
354.5	4267.0	4.94
354.5	4264.0	3.22
354.5	4261.0	3.68
354.5	4258.0	10.00
354.5	4255.0	18.54
354.5	4252.0	59.74
354.5	4249.0	162.04
354.5	4246.0	109.42
354.5	4244.15	77.88
354.5	4242.25	676.60
354.5	4240.75	13.96
354.5	4238.50	314.21
354.5	4235.50	323.19
354.5	4232.50	224.36
354.5	4228.50	242.40
354.5	4226.25	191.43
354.5	4223.00	134.54
354.5	4200.05	233.64

CUADRO 3.1. VALORES DE PERMEABILIDAD SEGUN LAS PERFORACIONES EFECTUADAS

A - 2

COTA= 4321.48 INCL = VERT PROG= 362

PROGRESIVA	COTA	LUGEON
386.0	4275.63	431.82
386.0	4272.63	22.64
386.0	4269.63	38.80
386.0	4266.63	143.64
386.0	4263.63	31.64
386.0	61.00	340.00
386.0	4257.63	48.82
386.0	4254.63	99.10
386.0	4251.63	38.55
386.0	4248.63	70.27
386.0	4245.63	69.10
386.0	4241.63	6.14



Valores de RQD y Litología en los sondajes  
exploratorios

Sondeo A - 2

Progresividad: As-362. Inclinación con la Horizontal: 90°

PROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
44-46	40.00	v v v v	Tufo Riodacitico
46-48	20.00	v v v v	Tufo Riolitico con presencia de zonas de falla
48-50	60.00	v v v v	
50-52	70.00	v v v v	
52-54	40.00	v v v v	
54-56	10.00	v v v v	
56-58	20.00	v v v v	
58-60	40.00	v v v v	
60-62	10.00	v v v v	Brecha volcanica
62-64	40.00	▽ v v v	
64-66	70.00	v v v v	Tufo
66-68	50.00	v v v v	Riodacitico
68-70	40.00	v v v v	Tufo riodacitico blanco. fallas
70-72	20.00	v v v v	
72-74	20.00	v v v v	Zona de falla
74-76	40.00	v v v v	
76-78	35.00	▽ v v v	Tufo Riolitico
78-80	20.00	v v v v	

## Valores de RQD y Litología en los sondajes exploratorios

Sondeo A - 2'

Progresiva: As-362.5. Inclinación con Horizontal: 65°

PROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
44-46	15.00	<u>vvvv</u>	Brecha Volcanica
46-48	20.00	<u>vvvv</u>	Tufo
48-50	20.00	<u>vv</u>	Riolitico
50-52	15.00	<u>vvvv</u>	
52-54	10.00	<u>vvvv</u>	Tufo
54-56	20.00	<u>vvvv</u>	Riodacitico blanco
56-58	20.00	<u>vvvv</u>	Tufo riolitico
58-60	10.00	<u>vvvv</u>	Zona de falla
60-62	10.00	<u>vvvv</u>	Tufo
62-64	10.00	<u>vv</u>	Riolitico
64-66	25.00	<u>vvvv</u>	Tufo
66-68	50.00	<u>vvvv</u>	Riodacitico
68-70	40.00	<u>vvvv</u>	
70-72	25.00	<u>vvvv</u>	
72-74	50.00	<u>vvvv</u>	
74-76	60.00	<u>vvvv</u>	
76-78	35.00	<u>vvvv</u>	
78-80	50.00	<u>vvvv</u>	
80-82	60.00	<u>vvvv</u>	
82-84	45.00	<u>vvvv</u>	
84-86	20.00	<u>vvvv</u>	
86-88	30.00	<u>vvvv</u>	Tufo
88-90	20.00	<u>vvvv</u>	
90-92	55.00	<u>vvvv</u>	
92-94	45.00	<u>vvvv</u>	
94-96	50.00	<u>vvvv</u>	Riolitico
96-98	40.00	<u>vvvv</u>	
98-100	40.00	<u>vvvv</u>	
100-102	30.00	<u>vvvv</u>	
102-104	70.00	<u>vvvv</u>	
104-106	70.00	<u>vvvv</u>	
106-108	50.00	<u>vvvv</u>	
108-110	25.00	<u>vvvv</u>	
110-112	10.00	<u>vvvv</u>	
112-114	40.00	<u>vvvv</u>	
114-116	55.00	<u>vvvv</u>	
116-118	70.00	<u>vvvv</u>	
118-120	20.00	<u>vvvv</u>	
120-122	60.00	<u>vvvv</u>	
122-124	60.00	<u>vvvv</u>	
124-126	65.00	<u>vvvv</u>	
126-128	70.00	<u>vvvv</u>	
128-130	60.00	<u>vvvv</u>	

## Valores De RQD y Litología en los Sondajes Exploratorios

## SONDEO A - 1

PROGRESIVA: aS 386 INCLINACIÓN CON LA HORIZONTAL: 90°

PROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
56-58	10.00	<u>v v v v v</u>	Tufo
58-60	10.00	<u>v v v v v</u>	
60-62	30.00	<u>v v v v v</u>	Riodacitico
62-64	20.00	<u>v v v v v</u>	blanco
64-66	40.00	<u>v v v v v</u>	Tufo Riolitico
66-68	45.00	<u>v v v v v</u>	Tufo Riodacitico
68-70	15.00	<u>v v v v v</u>	Tufo Riolitico
70-72	10.00	<u>v v v v v</u>	Presencia de
72-74	25.00	<u>v v v v v</u>	falla
74-76	20.00	<u>v v v v v</u>	Tufo
76-78	30.00	<u>v v v v v</u>	Riodacitico
78-80	10.00	<u>v v v v v</u>	blanco

## Valores de RQD y litología en los sondajes exploratorios

## SONDEO As - 0

PROGRESIVA :AS-404 Inclinación con la horizontal: 90°

ROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
0-2	40	<u>v v v v v</u>	Zona de falla
2-4	60	<u>v v v v v</u>	Tufo
4-6	70	<u>v v v v v</u>	Riolitico
6-8	60	<u>v v v v v</u>	Tufo Rio
8-10	50	<u>v v v v v</u>	Dacitico
10-12	55	<u>v v v v v</u>	blanco
12-14	25	<u>v v v v v</u>	
14-16	40	<u>v v v v v</u>	
16-18	15	<u>v v v v v</u>	
18-20	10	<u>v v v v v</u>	
20-22	15	<u>v v v v v</u>	
22-24	75	<u>v v v v v</u>	
24-26	70	<u>v v v v v</u>	
26-28	40	<u>v v v v v</u>	Tufo
28-30	60	<u>v v v v v</u>	Riolitico
30-32	70	<u>v v v v v</u>	
32-34	75	<u>v v v v v</u>	
34-36	60	<u>v v v v v</u>	
36-38	40	<u>v v v v v</u>	
38-40	80	<u>v v v v v</u>	
40-42	90	<u>v v v v v</u>	
42-44	80	<u>v v v v v</u>	
44-46	60	<u>v v v v v</u>	

Valores de RQD y litología en los sondeos exploratorios

SONDEO D-37

PROGRESIVA: AS-354.5 INCLINACION CON LA VERTICAL: 90°

PROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
3.0-5	50	<u>vvvv</u>	Tufo
5-7	15	<u>vvvv</u>	Riolitico
7-9	35	<u>vvvv</u>	
9-11	70	<u>vvvv</u>	
11-13	50	<u>vvvv</u>	Brecha volcanica
13-15	45	<u>vvvv</u>	Tufo
15-17	30	<u>vvvv</u>	Riolitico
17-19	15	<u>vvvv</u>	
19-21	10	<u>vvvv</u>	
21-23	25	<u>vvvv</u>	
23-25	20	<u>vvvv</u>	
25-27	25	<u>vvvv</u>	Tufo
27-29	10	<u>vvvv</u>	Riodacitico
29-31	10	<u>vvvv</u>	blanco
31-33	10	<u>vvvv</u>	con presencia
33-35	15	<u>vvvv</u>	de falla en el
35-37	10	<u>vvvv</u>	contacto inferior
37-39	10	<u>vvvv</u>	
39-41	15	<u>vvvv</u>	
41-43	30	<u>vvvv</u>	
43-45	35	<u>vvvv</u>	
45-47	15	<u>vvvv</u>	
47-49	20	<u>vvvv</u>	Tufo
49-51	25	<u>vvvv</u>	Riolitico
51-53	45	<u>vvvv</u>	
53-55	60	<u>vvvv</u>	
55-57	75	<u>vvvv</u>	
57-58.70	80	<u>vvvv</u>	

## Valores de RQD Litología en los Sondajes Exploratorios

SONDEO PC - 1

PROGRESIVA: AS-307. INCLINACION CON LA VERTICAL: 57°

PROFUNDIDAD	RQD	LITOLOGIA	
52-54	15.00	vvvv	Tufo Riolitico
54-56	15.00	vvvv	
56-58	10.00	vvvv	
58-60	10.00	vvvv	
60-62	10.00	vvvv	
62-64	10.00	vvvv	
64-66	10.00	vvvv	
66-68	15.00	vvvv	
68-70	50.00	vvvv	
70-72	50.00	vvvv	
72-74	15.00	vvvv	
74-76	25.00	vvvv	
76-78	10.00	vvvv	
78-80	10.00	vvvv	
80-82	10.00	vvvv	Tufo Riolitico
82-84	10.00	vvvv	
84-86	10.00	vvvv	
86-88	40.00	vvvv	
88-90	10.00	vvvv	
90-92	10.00	vvvv	
92-94	10.00	vvvv	
94-96	15.00	vvvv	
96-98	10.00	vvvv	
98-100	10.00	vvvv	
100-102	30.00	vvvv	
102-104	10.00	vvvv	
104-106	40.00	vvvv	
106-108	30.00	vvvv	
108-110	60.00	vvvv	
110-112	50.00	vvvv	
112-114	70.00	vvvv	
114-116	60.00	vvvv	
116-118	85.00	vvvv	
118-120	85.00	vvvv	
120-122	75.00	vvvv	
122-124	90.00	vvvv	
124-125	80.00	vvvv	

**d. Valores de las Características geomecánicas del maciso rocoso:**

La base para la clasificación del maciso es la Clasificación Geotécnica de Macizos Rocosos ( 15 Rm, 1978) cuyos parámetros son:

- Grado de Alteración:
  - A-1 Roca no Alterada (fresco)
  - A-2 Roca poco alterada (apreciable oxidación de las juntas).
  - A-3 Roca moderadamente alterada (matriz poco alterada)..
  - A-4 Roca muy alterada (matriz profundamente alterada).
  - A-5 Roca completamente alterada (suelo con vestigios de estructura alterada).
  - A-6 Suelo residual.
  
- Grado de Dureza de la roca
  - D-1 Muy dura (difícil de quebrar con martillo).
  - D-2 Dura (se quiebra con facilidad al golpe del martillo).
  - D-3 Medio dura (extremos difíciles de romper con los dedos).
  - D-4 Ligeramente dura (difícilmente se despedaza con los dedos)
  - D-5 Suave (facilmente rota con los dedos).
  
- Grado de fracturación de la roca
  - F-1 < 1 Fract/m (poco fracturada).
  - F-2 1-5 Fract/m (fracturado).
  - F-3 6-10 Fract/m (muy fracturado).
  - F-4 11-20 Fract/m (extremadamente fracturada).
  - F-5 >20 Fract/m (fragmentado).

En función a estos se han determinado, de los testigos de perforación los siguientes datos:

Valores de Alteración , Dureza y Fracturamiento de la Roca en  
 el Sondaje  
 SONDEO A - 2  
 PROGRESIVA : AS-362

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
40.0-48.5	A-3	41.5-55	D-1	42.5-43.8	F4
48.5-66.5	A-2	55.0-55.5	D-2	43.8-450	F5
66.5 -80.0	A-4	55.5-77.5	D-1	45.0-45.7	F4
		77.5-80	D-3	45.7-46.0	F3
				46.0-48.5	F-5
				48.5-49.0	F-3
				49.0-50.3	F-5
				50.3-51.1	F-4
				51.1-53.1	F-4
				53.1-57.7	F-5
				57.7-60.5	F-4
				60.5-62.5	F-5
				62.5-62.9	F-4
				62.9-64.0	F-5
				64.0-65.5	F-4
				65.5-66.25	F-3
				66.2-68.50	F-4
				68.5-70.0	F-3
				70.0-70.75	F-3
				70.3-80.0	F-2

Valores de Alteración, Dureza y Fracturamiento de la Roca en El  
 Sondaje A-1  
 SONDEO A - 1  
 PROGRESIVA: AS-386

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
55.0- 80.0	A-4	53.75-60.7	D-4	51.40 - 80	F-5
		60.75- 615	D-5		
		61.00-80	D-4		

Valores de Alteración, Dureza y Fracturamiento de la Roca en el  
 Sondaje D-37  
 SONDEO D - 37  
 PROGRESIVA: AS-354.5

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
3.2 - 7.5	A-3	3.2 - 7.5	D-3	3.2 - 5.0	F-3
7.5 - 8.5	A-2	7.5 - 8.5	D-2	5.0 - 6.0	F-4
8.5 -12.5	A-3	8.5 -12.5	D-3	6.0 -14.5	F-3
12.5 -13.5	A-2	12.5 -13.5	D-2	14.5 -18.0	F-4
13.5 -20.5	A-3	13.5 -58.7	D-3	18.0 -21.5	F-3
20.5 -40.5	A-4			21.5 -23.0	F-4
40.5 -58.7	A-3			23.0 -25.0	F-3
				25.0 -31.0	F-4
				39.0 -39.0	F-5
				39.0 -44.5	F-4
				44.5 -45.5	F-3
				45.5 -54.0	F-4
				54.0 -56.5	F-3
		56.5 -58.7	F-2		



Valores de Alteración, Dureza y Fracturamiento de la roca en el  
Sondaje As-0

SONDEO As - 0

PROGRESIVA AS-404

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
0.0 -8.0	A-3	00.0-15.0	D-3	0.0- 1.0	F-4
8.0 -32.0	A-4	15.0-15.5	D-2	1.0- 3.0	F-3
32.0 -46.0	A-3	15.5-46.0	D-3	3.0- 3.5	F-4
				3.5- 8.0	F-3
				8.0- 9.0	F-4
				9.0-10.5	F-2
				10.5-14.0	F-3
				14.0-15.0	F-2
				15.0-18.5	F-3
				18.5-21.0	F-4
				21.0-28.0	F-3
				28.0-46.0	F-2

Valores de Alteración, Dureza y Fracturamiento de la  
Roca en el Sondaje A-2'

SONDEO A - 2'  
PROGRESIVA: AS-362.5

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
50.0 -54.0	A-2	50.0-130.0	D-1	50.0-51.2	F-4
54.0 -72.0	A-4			51.2-64.8	F-5
72.0 -111.0	A-3			64.8-67.0	F-4
111.0 -130.0	A-1			67.0-79.0	F-5
		79.0-96.8	F-3		
		96.8-99.0	F-4		
		99.0-126.0	F-3		
		126.0-130.0	F-2		

Valores de Alteración, Dureza y Fracturamiento de la Roca en el  
Sondaje PC-1

SONDEO PC - 1  
PROGRESIVA: AS-307

A		D		F	
Profundidad	Rango	Profundidad	Rango	Profundidad	Rango
50.0-63.0	A-3	50.0-63.0	D-4	50.0-68.0	F-5
63.0-69.0	A-4	63.0-99.5	D-3	68.0-70.5	F-3
69.0-90.5	A-3	99.5-109.0	D-4	70.5-71.8	F-5
90.5-109.0	A-4	109.0-125.0	D-3	71.8-73.2	F-3
109.0-125.0	A-2			73.2-112.0	F-5
				112.0-118.0	F-3
				118.0-125.0	F-4

### 3.3. DISEÑO DE LAS INYECCIONES DE IMPERMEABILIZACION

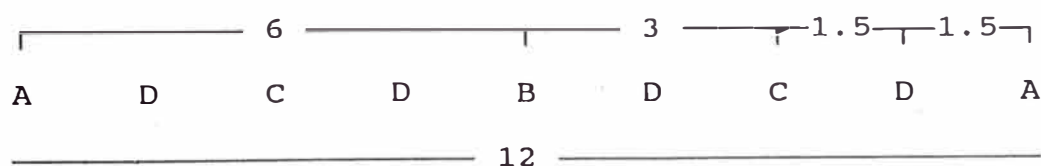
#### 3.3.1. Introducción

Estas inyecciones han sido realizadas en dos frentes de trabajo: galería de investigación y cámara de compuertas. Las profundidades son variables estando en función del límite de pantalla, características geomecánicas de la roca, litología, etc. Estas inyecciones han tenido previamente un trabajo de consolidación, variable según sea la zona de inyección. Los datos obtenidos en este capítulo serán analizados en el ítem 4.0.

#### 3.3.2. Categorías de los agujeros de inyección

Se han categorizado los agujeros de inyección en cuatro tipos:

- Primarios (A) .- ubicados cada 12 mt.
- Secundarios (B).- ubicados equidistante de los anteriores
- Terciarios(C).- ubicados equidistante de los secundarios
- Cuaternarios (D).- ubicados equidistante de los terciarios



Se realiza esta diferencia, porque se debe de perforar e inyectar siguiendo un programa, el cual contempla primero las inyecciones de los taladros primarios, luego los secundarios . Culminados estos se pasa a los terciarios y finalmente los cuaternarios.

### **3.3.3. Ubicación y descripción de la malla de los agujeros de inyección**

Para una mejor explicación he creído conveniente tratar este punto en dos partes, uno referente a las disposiciones de los agujeros en la cámara de compuertas y el otro en la galería de investigación. La descripción que ha continuación se presenta es el diseño original de la disposición de los taladros, este varió a medida que se fue realizando el trabajo, teniéndose al concluir la construcción un diseño diferente del original, del que se tratará más adelante. La pantalla llega a una cota<sup>9</sup> aproximada de 4258 msnm en la progresiva A<sub>350</sub> y de 4266 en la progresiva A<sub>404</sub>. El nivel freático tiene su punto más alto en la cota 4275.

#### **a.- Cámara de Compuertas:**

El tipo de inyección es radial. Consta de tres hileras de inyección, denominadas Du (fila ubicada aguas arriba del eje de pantalla), Dd (fila ubicada aguas abajo del eje de pantalla) y D (fila ubicada en el eje de pantalla). Las dos primeras son de

consolidación teniendo un aspecto radial, mientras que la última es de impermeabilización y se ubican en el piso de la cámara de compuertas. Las longitudes de los taladros de consolidación son de 8.0 m. ubicados a 1.0 m. uno del otro que harían un total de 70 perforaciones. Las longitudes de las perforaciones para las inyecciones de impermeabilización son de 21.5 m para los taladros D-36, D-38 y D-39, mientras que para el D-37 es de 55.0 mt., este último es exploratorio. Ver Fig. 3.1

**b.- Galería de investigación:**

Los taladros en esta área están ubicados en el techo y piso de la galería. En el piso se tienen tres hileras separadas 0.5 mt una de otra. Las laterales corresponden a inyecciones de consolidación, tienen una profundidad de 6.0 mt. Han sido denominadas Spu y Spd; aguas arriba y aguas abajo respectivamente, teniéndose como referencia la hilera central que ha sido denominada As. En esta las profundidades de los taladros son variables oscilando entre 8.0 y 46.0 mt. habiéndose realizado un sondeo exploratorio de 46.0 mt., de los cuales ha sido inyectado el tramo de 28.0 a 0.00 mt. Es importante recalcar que los taladro de una misma hilera están separados 1.5 mt. y en conjunto las tres filas se ubican a manera de tresbolillo.

En el techo los taladros son de consolidación. Son dos hileras llamadas Stu y Std, todos con una

longitud de 6.0 mt., proyectados perpendicularmente sobre la fila Spu y Spd. Ver Fig. 3.2

#### **3.3.4. Especificaciones técnicas:**

Están orientadas básicamente al tipo de mezcla, presiones y volúmenes de inyección, ya que estos son los parámetros que se deben tener en cuenta durante la inyección.

##### **a. Tipo de mezclas:**

Los tipos de mezclas utilizadas se describen a continuación. (para mejor información ver cuadro adjunto):

La mezcla 0.7:1.0 con sika-ment y sika-aer se utiliza cuando el tramo a inyectar esta por debajo de los 8.0 mt. de profundidad. Para los tramos de 8.0 a 0.0 mt. se utiliza la mezcla 0.7:1.0 pero con lignosulfanato de calcio y soda cáustica, mientras que la mezcla 0.5:1.0 se le utiliza cuando se llega al límite de volumen de inyección, este tema se tratará en el siguiente punto.

A continuación se hace una breve explicación de las características principales de cada aditivo:

- Sika-Ment: (Reductor de agua de alto poder)

Descripción: Es un líquido color café compuesto de 9 resinas sintéticas. Es un economizador de cemento.

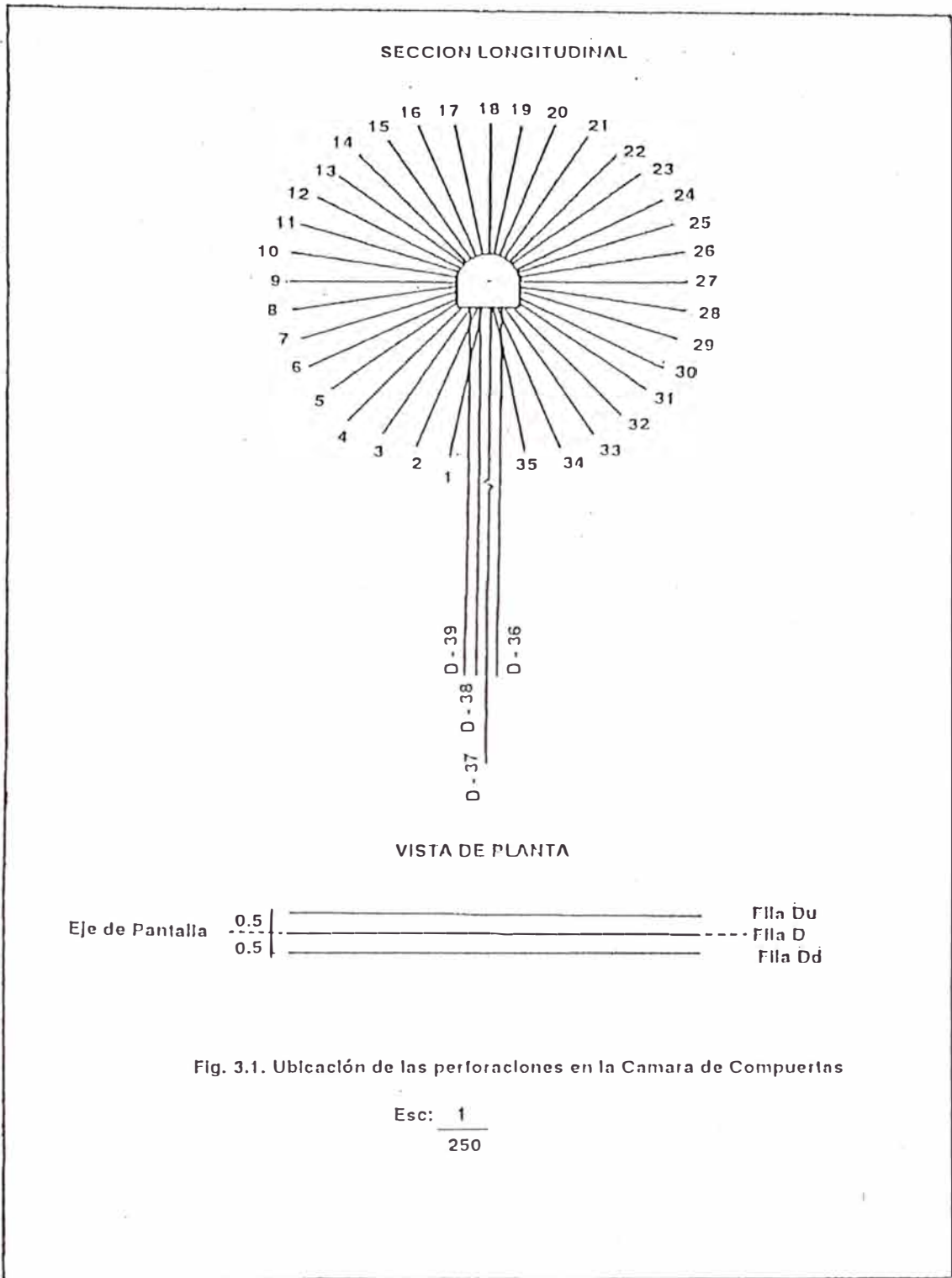


Fig. 3.1. Ubicación de las perforaciones en la Cámara de Compuertas

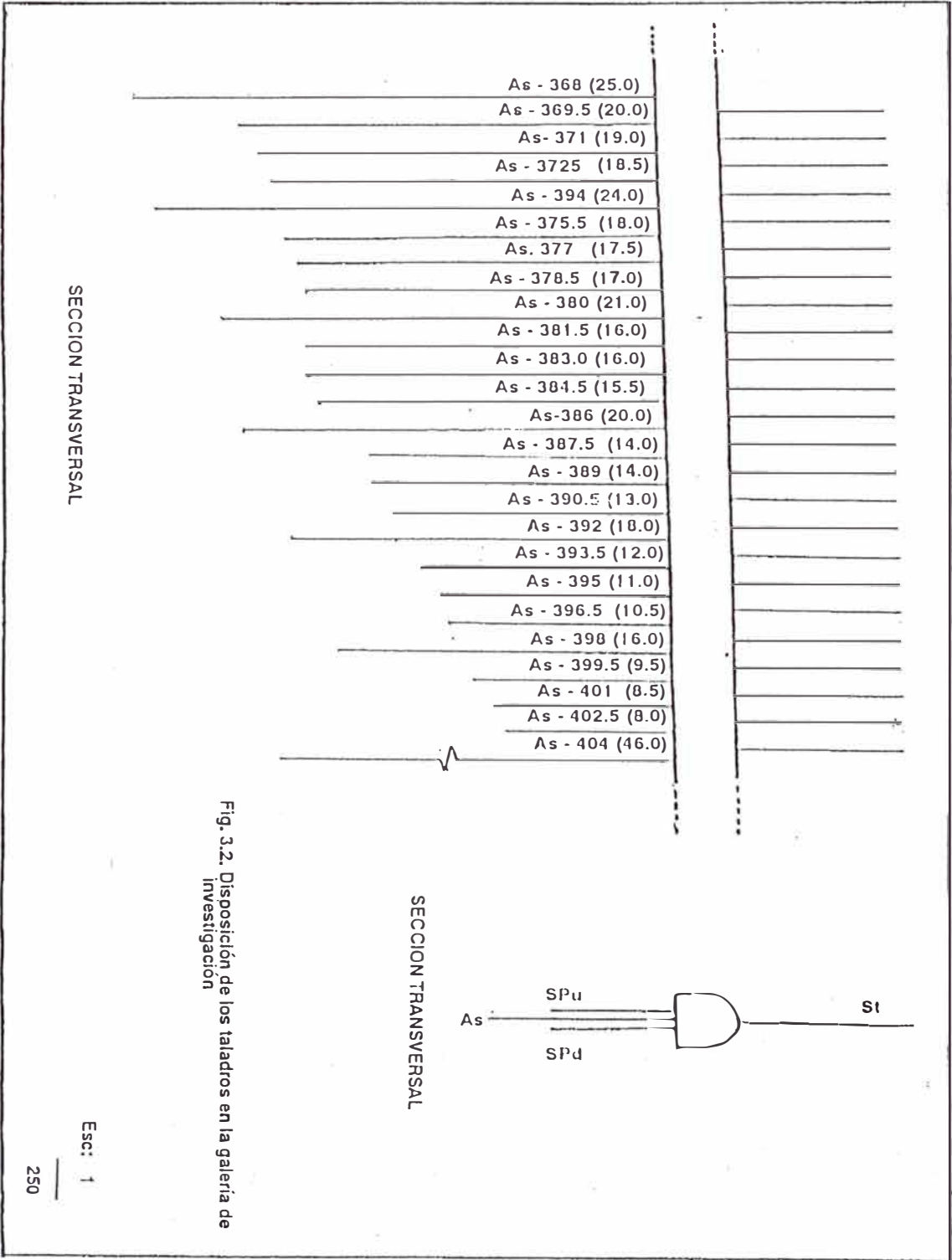


Fig. 3.2. Disposición de los taladros en la galería de investigación



TIPOS DE MEZCLAS UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCION DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION

MEZCLA		FLUIDEZ MARSH(KG)	CEMENTO KG	AGUA LT	A D I T I V O S										VOLUMEN TOTAL (LT)
AGUA	CEMENTO				BENTONITA		SIKA-MENT		SIKA-AER		LIGNOSULFONATO		SODA CAUSTICA		
					LT	KG	LT	KG	LT	KG	LT	KG	LT	KG	
0.7	1	34-32	85.0	59.5	-.-	-.-	0.354	0.425	0.042	0.042	-.-	-.-	-.-	-.-	87.05
			85.0	59.5	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	86.88
0.5	1	32 - 28	85.0	42.5	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	0.34	0.35	1.0	1.47	69.63

No contiene cloruros. Le da una mayor fluidez a la mezcla.

Usos: tiene tres usos principales: como superplastificante, como reductor de agua y como economizador de cemento.

Modo de empleo: Como superplastificante se le incorpora directamente a la mezcla de inyección.

Datos técnicos: Tiene una densidad de 1.2 gr/cc, cumpliendo con las normas ASTM.C-494, ASTM.C-1017 e ICONTEC 1299.

Dosificación: De 0.5 al 1.0 % del peso de cemento. En nuestro caso se utilizo el 0.5% del peso del cemento.

**- Sika-Aer: (Incorporador de aire).**

Descripción: Es un aditivo líquido color amarillo claro, que incorpora una cantidad controlada de aire en la mezcla o concreto. No contiene cloruros. Su función es mantener en suspensión los granos de cemento para así evitar su sedimentación.

Usos: Se emplea cuando se desea incrementar la impermeabilización de la mezcla, aumentar la durabilidad de la mezcla en ambientes agresivos (agua de mar, aguas o suelos sulfatados) y para mejorar el bombeamiento de la mezcla con deficiencia de finos.

Modo de empleo: Lo mismo que el sika-ment.

Datos técnicos: Posee una densidad de 1.0 gr/cc. y cumple con la norma ASTM.C-260 como aditivo incorporador de aire.

Dosificación: Del 0.03 al 1.0 % del peso de cemento en la mezcla. En las mezclas utilizadas en este caso la dosificación es del 0.05%

**Lignosulfonato de Calcio y Soda Cáustica o Hidróxido de Sodio:**

Estos aditivos logran una mezcla con una mayor fluidez. El lignosulfonato de calcio transparente<sup>9</sup> mientras que la soda cáustica es marrón café, las densidades son 1.029 y 1.47 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente.

**b. Presiones y volúmenes de inyección:**

El método de inyección aplicado es el llamado PxV o GIN, en el que se debe tener en cuenta la presión, el volumen de inyección y el caudal, como se hace referencia en el ítem 2.1.6.

La presión y volumen de inyección varía según la categoría del taladro, así tenemos:

Para taladros Primarios y Secundarios: El PxV = 10000.(Fig. 3.3).

- Para taladros terciarios: El PxV = 7000 (Fig. 3.4).

Para taladros cuaternarios: El PxV = 4000 (Fig. 3.5).

TALADROS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

P\*V = 10000

P	V	P*V	P*V
25.0	331	3.9	7.7
24.5	339	3.9	7.9
24.0	345	4.0	7.9
23.5	351	4.0	8.1
23.0	357	4.1	8.2
22.5	364	4.2	8.4
22.0	370	4.3	8.5
21.5	377	4.3	8.7
21.0	385	4.4	8.8
20.5	392	4.5	9.0
20.0	400	4.6	9.2
19.5	409	4.7	9.4
19.0	417	4.8	9.6
18.5	426	4.9	9.8
18.0	435	5.0	10.0
17.5	444	5.1	10.2
17.0	455	5.2	10.4
16.5	465	5.3	10.7
16.0	476	5.5	10.9
15.5	488	5.6	11.2
15.0	500	5.7	11.5
14.5	513	5.9	11.8
14.0	526	6.0	12.1
13.5	541	6.2	12.4
13.0	558	6.4	12.8
12.5	571	6.6	13.1
12.0	588	6.8	13.5
11.5	606	7.0	13.9
11.0	625	7.2	14.4
10.5	645	7.4	14.8
10.0	667	7.7	15.3
9.5	690	7.9	15.8
9.0	714	8.2	16.4
8.5	741	8.5	17.0
8.0	769	8.8	17.7
7.5	800	9.2	18.4
7.0	831	9.6	19.1
6.5	870	10.0	20.0
6.0	909	10.4	20.9
5.5	952	10.9	21.9
5.0	1000	11.5	23.0
4.5	1053	12.1	24.2
4.0	1111	12.8	25.5
3.5	1176	13.5	27.0
3.0	1250	14.4	28.7
2.5	1333	15.3	30.6
2.0	1429	16.4	32.8
1.5	1538	17.7	35.3
1.0	1657	19.1	38.3
0.5	1918	20.9	41.8
0.3	2000	23.0	45.0
0.2	2222	25.5	51.1
0.15	2500	28.7	67.4
0.1	2524	29.0	58.0

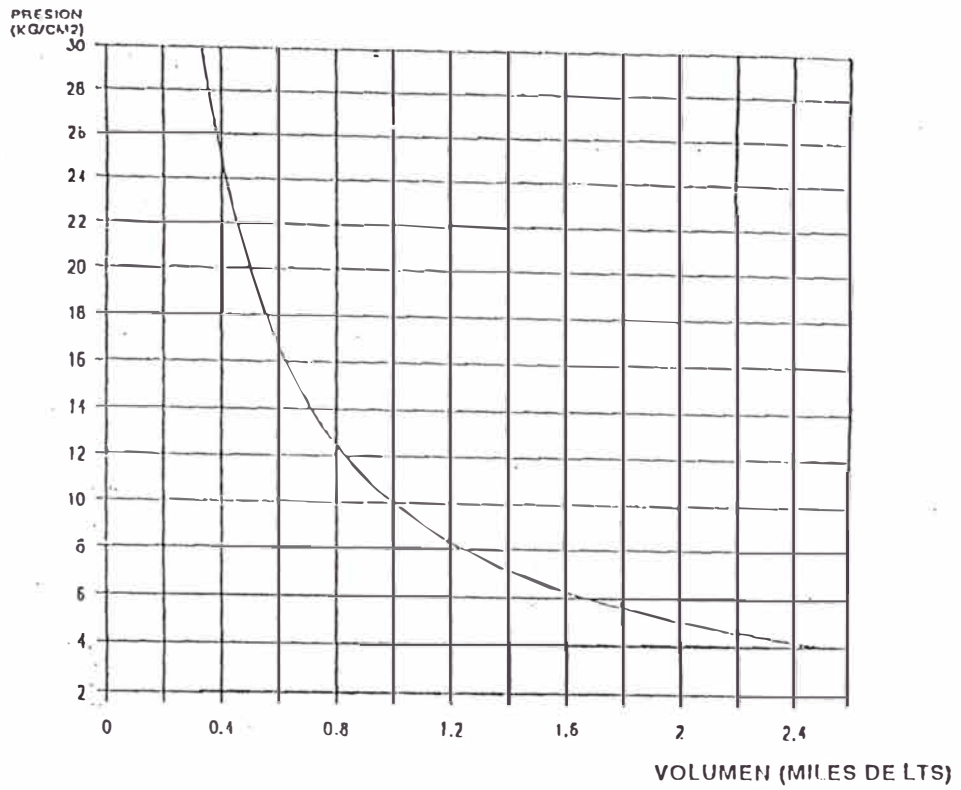


Fig. 3.3. Curva P x V para taladros primarios y secundarios

TALADROS TERCIARIOS

P·V = 7000

P	V	Nº Mts	Nº Pts
30.0	233	2.7	3.2
29.8	237	2.7	3.6
29.0	241	2.8	3.5
28.5	246	2.8	3.8
28.0	250	2.9	3.7
27.3	253	2.9	3.0
27.0	259	3.0	3.0
26.6	264	3.0	3.1
26.0	269	3.1	3.2
25.5	273	3.2	3.3
25.0	277	3.2	3.4
24.5	286	3.3	3.4
24.0	292	3.4	3.4
23.5	299	3.4	3.4
23.0	304	3.5	3.4
22.5	311	3.5	3.4
22.0	318	3.7	3.4
21.5	326	3.7	3.4
21.0	333	3.8	3.4
20.6	341	3.9	3.4
20.0	350	4.0	3.4
19.5	359	4.1	3.4
19.0	368	4.2	3.4
18.3	378	4.3	3.4
18.0	389	4.5	3.4
17.3	400	4.6	3.4
17.0	412	4.7	3.4
16.3	424	4.9	3.4
16.0	437	5.0	3.4
15.5	452	5.2	3.4
15.0	467	5.4	3.4
14.5	493	5.5	3.4
14.0	500	5.7	3.4
13.5	519	6.0	3.4
13.0	530	6.2	3.4
12.5	560	6.4	3.4
12.0	500	6.7	3.4
11.5	609	7.0	3.4
11.0	635	7.3	3.4
10.3	667	7.7	3.4
10.0	700	8.0	3.4
9.5	737	8.5	3.4
9.0	770	8.9	3.4
8.5	824	9.5	3.4
8.0	875	10.1	3.4
7.5	933	10.7	3.4
7.0	1020	11.5	3.4
6.5	1077	12.4	3.4
6.0	1167	13.4	3.4
5.5	1273	14.6	3.4
5.0	1408	16.1	3.4
4.5	1556	17.9	3.4
4.0	1750	20.1	3.4
3.5	2000	23.0	3.4

PRESSION  
(KG/CM<sup>2</sup>)



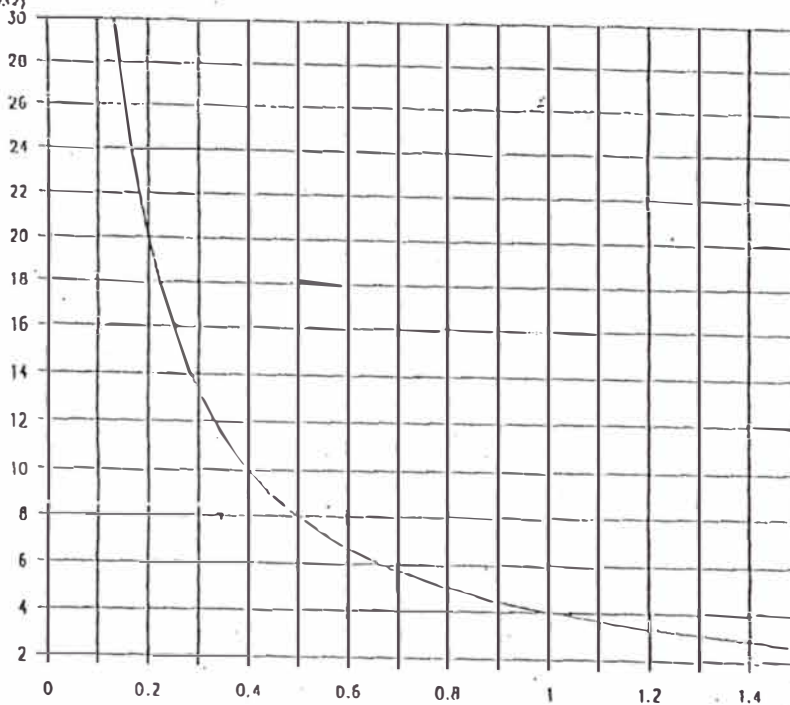
Fig. 3.4. Curva P x V para taladros terciarios

TALADROS CUATERNARIOS

V = 4000

V	Nº Alit	Nº BIP
30.0	133	3.1
29.5	136	3.1
29.0	139	3.2
28.5	140	3.2
28.0	143	3.3
27.5	145	3.3
27.0	149	3.4
26.5	161	3.5
26.0	154	3.5
25.5	157	3.6
25.0	160	3.7
24.5	163	3.8
24.0	167	3.8
23.5	170	3.9
23.0	174	4.0
22.5	178	4.1
22.0	182	4.2
21.5	186	4.3
21.0	190	4.4
20.6	195	4.5
20.0	200	4.6
19.5	205	4.7
19.0	211	4.8
18.5	216	5.0
18.0	222	5.1
17.6	229	5.3
17.0	235	5.4
16.3	242	5.6
16.0	250	5.7
15.5	258	5.9
15.0	267	6.1
14.5	276	6.3
14.0	286	6.6
13.5	296	6.8
13.0	308	7.1
12.5	320	7.4
12.0	333	7.7
11.6	349	8.0
11.0	374	8.4
10.5	401	8.8
10.0	400	9.2
9.5	421	9.7
9.0	444	10.2
8.6	471	10.8
8.0	500	11.5
7.5	533	12.3
7.0	571	13.1
6.5	615	14.1
6.0	667	15.3
5.6	727	16.7
5.0	800	18.4
4.6	800	20.4
4.0	1000	23.0
3.5	1143	26.3
3.0	1333	30.6
2.7	1400	34.0

PREISION  
(KG/CM<sup>2</sup>)



VOLUMEN (MILES DE LTS)

Fig. 3.5. Curva P x V para taladros cuaternarios

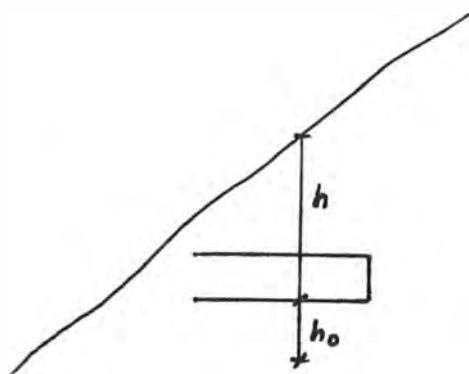
Para determinar la presión de rechazo se aplica la siguiente fórmula:

$$P = ( h + h_o ) * 0.5$$

Donde: P = Presión de rechazo

$h =$  (Cota de terreno en superficie) - (Cota del taladro en la galería).

$h_o =$  (Cota del taladro en galería) - (Cota del tramo a inyectar).



La fórmula se cumple hasta una profundidad de 8.00 mt. a partir de los cuales se tienen las siguientes presiones de rechazo:

TRAMO (M)	PRESION (KG/CM2)
0.0 - 2.0	2.0
2.0 - 3.0	3.0
3.0 - 4.0	5.0
4.0 - 5.0	8.0

5.0 - 6.0	12.0
6.0 - 7.0	14.0
7.0 - 8.0	16.0

NOTA: La presión de rechazo en ningún momento debe de sobrepasar los 30 Kg/Cm<sup>2</sup>.

Maneras de llegar al rechazo:

Con el método aplicado en este caso, existen tres maneras de llegar al rechazo:

Rechazo por límite de volumen: La inyección se inicia con la mezcla 0.7:1.0 hasta un determinado volumen, para continuar la inyección con una mezcla más densa (0.5:1.0) hasta tener un caudal bajo. La presión de cambio de mezcla es variable en cada taladro y tramo. Cuando se reinicia la inyección con esta segunda mezcla se debe hacer con la presión en la cual se realizó el cambio de lechada. El límite de volumen varía según la categoría del taladro, así tenemos:

Para taladros primarios y secundarios: 2524 lt.

Para taladros terciarios : 2000 Lt.

Para taladros cuaternarios : 1480 Lt.



## ANALISIS DE COSTOS

MEZCLA	0.7/1 (US\$)	0.5/1 (US\$)
1. Mano de Obra	90	90
2. Equipo		
- Alquiler	120	120
- Depreciación	30	30
- Mantenimiento	10	10
3. Materiales		
- Cemento	110	110
- Aditivos	50	66
4. Imprevistos	50	50
5. Utilidad y Gastos Generales (20%)	92	95
6. Costo Total	552	571

- Rechazo por gráfico: Se llega a este rechazo cuando a una determinada presión se tiene un caudal menor a 2 Lt/Min.
  - Rechazo por presión: En la que el caudal es menor a 2 Lt/Min cuando se esta inyectando a la presión de rechazo correspondiente a ese tramo de inyección.
- c. Costo de mezcla por tonelada de cemento inyectado: a continuación se da un cuadro con los costos por tonelada de cemento inyectado. Cabe mencionar que estos datos son a groso modo ya que no es tema principal en el presente estudio.

### 3.3.5. Procedimientos aplicados:

El procedimiento de inyección es el siguiente:

- a. Se baja el obturador hasta el tramo a inyectar, se obtura y se rompe manguito con agua a alta presión.
- b. Luego de haberse inyectado una determinada cantidad de mezcla (300 lt) se determina la presión y el caudal. En base a estos parámetros se determinará el tipo de rechazo a emplear:
  - b.1 Si la presión esta cerca a la presión de rechazo y el caudal es bajo se continua con la misma presión hasta llegar al rechazo por presión.
  - b.2 Si se tiene una presión alta o baja pero con un caudal alto (mayor a 10 lt/min) pueden ocurrir dos casos:

Caso 1: El rechazo se alcanza por gráfico. La presión se debe ir bajando cada cinco minutos teniendo en cuenta las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 a medida que el volumen aumenta. En cualquier momento el producto de la presión por el volumen debe ser igual a 10000, 7000 ó 4000 Kg x Lt dependiendo de la categoría del taladro que se esta inyectando. En este tipo de rechazo se debe llegar a caudales inferiores a 3 lt/min y una presión inferior a la mínima contemplada en la figura.

Caso 2: El rechazo se logra por límite de volumen. Este tipo de rechazo se da, cuando se llega a la presión mínima admitida por el gráfico, con un caudal alto y el volumen límite correspondiente. En ese instante se debe de cambiar la dosificación a 0.5:1.0 con aditivos (sika-ment y sika-aer); recordar la inyección se inicia con 0.7:1.0, si luego de inyectados 3 mix de esta nueva mezcla no se logrado un caudal bajo, se le restringe de aditivos, hasta lograr un caudal bajo. Las presiones de inyección promedio de cada taladro al llegar al rechazo se presentan en el cuadro 3.2.

### **3.3.6. Volúmenes de inyección según la categoría de los agujeros inyectados.**

Los primeros taladros en inyectarse son los primarios y secundarios. Se ha observado que en estos las tomas son

más altas comparadas con las tomas en los taladros terciarios y cuaternarios, existiendo algunas excepciones. En una segunda y tercera fase se inyectaron los taladros terciarios y cuaternarios, respectivamente. Los taladros de impermeabilización son 37. Los volúmenes de inyección se presentan en los siguientes cuadros 3.3 y 3.4:

CUADRO 3.2. PRESIONES DE RECHAZO PROMEDIO

TALADRO	TIPO	PRS.DE RECHAZO KG/CM2
A-350	P	8.0
D-36	C	27.5
D-37	P	9.0
D-38	C	29.0
D-39	S	12.0
A-357.5	C	28.0
A-359.0	T	18.5
A-360.5	C	27.0
A-362.0	P	8.5
A-363.5	C	26.0
A-365.0	T	20.0
A-366.5	C	25.5
A-368.0	S	15.5
A-369.5	C	29.5
A-371.0	T	23.0
A-372.5	C	28.5
A-374.0	P	10.0
A-375.5	C	29.0
A-377.0	T	23.5
A-378.5	C	28.5
A-380.0	S	17.0
A-381.5	C	28.5
A-383.0	T	22.5
A-384.5	C	29.0
A-386.0	P	10.5
A-387.5	C	27.5
A-389.0	T	23.5
A-390.5	C	28.0
A-392.0	S	14.0
A-393.5	C	27.5
A-395.0	T	23.0
A-396.5	C	28.5
A-398.0	P	11.0
A-399.5	C	28.0
A-401.0	T	28.0
A-402.5	C	28.5
A-404.0	S	15.0

CUADRO 3.3

VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS TALADROS INYECTADOS

PROGRESIVA	A-350	D-36	D-37	D-38	D-39	A-357.5
PROF.PERF. (M)	63.00	21.50	56.00	21.50	21.50	63.00
TOT.CEM. (Kg)	11661.01	2692.05	2809.85	1737.26	3364.41	2369.85
TOT.BENT. (Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	64.49	14.92	15.55	9.65	18.70	13.11
HIDX.SOD. (Kg)	0.00	4.90	2.17	5.78	15.80	0.00
LIGNOULF (Kg)	0.00	1.67	0.50	2.13	1.90	0.00
TOT.INY.(Kg)	11725.50	2713.54	2828.07	1754.82	3400.81	2382.96
METROS INY.	27.00	20.50	25.00	20.50	20.50	24.00
PRO.INY/m.l.	434.28	132.37	113.12	85.60	165.89	99.29
CATEGORIA	P	C	P	C	S	C
0 - 1	222.20	0.00	24.30	13.02	148.00	341.80
1 - 2	162.30	0.00	24.30	8.68	60.40	529.90
2 - 3	392.90	0.00	0.00	8.68	43.40	844.62
3 - 4	0.00	0.00	30.38	130.23	60.70	0.00
4 - 5	0.00	0.00	0.00	130.23	139.00	0.00
5 - 6	299.14	211.53	9.55	202.11	17.40	0.00
6 - 7	316.23	211.53	19.80	202.11	0.00	0.00
7 - 8	179.50	196.57	59.00	55.55	94.00	0.00
8 - 9	51.27	196.57	98.20	55.55	77.00	0.00
9 - 10	0.00	183.75	0.00	34.18	25.60	0.00
10 - 11	0.00	183.75	0.00	34.19	85.46	0.00
11 - 12	0.00	47.00	0.00	0.00	119.17	0.00
12 - 13	392.90	47.00	94.00	0.00	675.20	0.00
13 - 14	0.00	25.63	0.00	115.38	401.70	358.96
14 - 15	504.26	25.63	0.00	115.38	743.60	307.68
15 - 16	115.38	76.92	0.00	29.91	18.00	0.00
16 - 17	115.38	76.92	0.00	29.91	435.90	0.00
17 - 18	982.88	324.78	19.80	8.54	42.70	0.00
18 - 19	982.88	324.78	93.00	8.54	111.00	0.00
19 - 20	803.40	290.59	0.00	286.31	68.40	0.00
20 - 21	803.40	290.59	16.24	286.32	34.18	0.00
21 - 22	1038.42		29.00			0.00
22 - 23	1038.42		923.00			0.00
23 - 24	641.00		444.40			0.00
24 - 25	641.00		943.10			
25 - 26	1021.32					
26 - 27	1021.32					

PROGRESIVA	A-359	D-360.5	A-362	A-363.5	A-365	A-366.5
PROF.PERF. (M)	70.00	66.00	80.00	66.00	67.00	63.00
TOT.CEM. (Kg)	25344.90	8666.94	50902.50	21948.83	12357.69	9537.11
TOT.BENT.(Kg)	0.00	0.00	438.22	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	140.17	47.93	283.94	121.39	68.34	52.74
SIL. + ACT(Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LIGNOULF (Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOT. INY. (Kg)	25485.07	8714.87	51624.66	22070.22	12426.03	9589.85
METROS INY.	31.00	25.00	38.00	25.00	26.00	26.00
PRO. INY/m. 1.	822.10	348.59	1358.54	882.81	477.92	368.84
CATEGORIA	T	C	P	C	T	C
0 - 1	1333.30	660.90	2046.90	1406.70	170.93	0.00
1 - 2	1213.63	660.90	1725.60	1389.60	283.06	166.30
2 - 3	1213.63	660.90	1259.80	1068.30	0.00	69.00
3 - 4	1878.00	461.52	1010.20	602.50	363.49	180.75
4 - 5	1878.00	461.52	1857.23	551.20	363.49	222.90
5 - 6	1722.17	461.52	4073.03	918.75	243.60	163.30
6 - 7	1622.17	464.34	1346.60	1034.10	243.60	125.50
7 - 8	811.43	464.34	1530.40	884.80	418.80	208.20
8 - 9	811.43	464.34	1542.90	1068.60	1669.34	325.70
9 - 10	1495.67	0.00	1672.43	1081.10	1649.52	364.20
10 - 11	854.67	0.00	1258.53	867.47	1816.18	222.20
11 - 12	1136.71	0.00	0.00	1204.60	1598.24	303.40
12 - 13	1136.71	551.26	0.00	1529.40	649.55	346.20
13 - 14	487.16	551.26	0.00	888.20	51.27	576.80
14 - 15	487.16	551.26	4386.00	854.00	119.96	880.30
15 - 16	595.46	0.00	4386.00	1486.70	189.89	773.30
16 - 17	595.46	0.00	4386.00	1311.70	572.62	662.20
17 - 18	595.46	403.41	0.00	735.00	197.33	722.00
18 - 19	641.00	675.20	0.00	401.70	0.00	752.00
19 - 20	641.00	675.20	0.00	478.50	119.65	632.50
20 - 21	1149.53	0.00	831.16	606.70	453.00	457.20
21 - 22	521.34	0.00	831.16	487.20	0.00	393.20
22 - 23	521.34	0.00	831.16	414.40	0.00	367.50
23 - 24	452.97	273.50	47.10	423.00	133.90	354.60
24 - 25	452.97	273.50	47.10	376.00	561.25	218.00
25 - 26	0.00		47.10		558.16	102.60
26 - 27	0.00		44.20			
27 - 28	0.00		44.20			
28 - 29	0.00		44.20			
29 - 30	568.35		4447.50			
30 - 31	568.35		4447.50			
31 - 32			4447.50			
32 - 33			784.98			
33 - 34			784.98			
34 - 35			365.80			
35 - 36			365.80			
36 - 37			365.80			
37 - 38			365.80			

CUADRO 3.3B.: VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS AGUJEROS INYECTADOS

PROGRESIVA	As-368	aS-369.5	As-371	As-372.5	As-372.5	A-366.5
PROF.PERF. (M)	25.00'	23.00	24.50	23.00	24.00	19.00
TOT.CEM. (Kg)	5228.34	555.81	6284.84	2629.72	7631.84	813.08
TOT.BENT.(Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	28.98	3.11	34.81	14.58	42.32	4.53
HDR.SOD. (kg)	8.45	5.53	6.60	5.01	15.50	4.02
LIGNOULF (Kg)	2.65	1.75	2.25	1.58	4.38	1.27
TOT.INY.(Kg)	5268.44	566.20	6328.50	2650.89	7694.04	822.90
METROS INY.	31.00	25.00	38.00	25.00	26.00	26.00
PRO.INY/m.1.	169.95	22.65	166.54	106.04	295.92	31.65
CATEGORIA	S	C	T	C	T	C
1 - 2	63.16	39.75	177.50	18.85	46.15	43.95
2 - 3	192.16	88.85	44.70	10.00	59.04	28.65
3 - 4	81.50	64.60	0.00	163.50	63.45	28.65
4 - 5	165.80	96.75	30.40	110.30	437.90	59.50
5 - 6	165.80	165.25	98.90	110.30	237.97	59.50
6 - 7	8.68	0.00	216.50	0.00	295.20	0.00
7 - 8	17.40	0.00	17.30	0.00	51.30	0.00
8 - 9	51.27	0.00	25.60	256.60	145.30	68.40
9 - 10	0.00	0.00	59.80	59.82	102.56	68.40
10 - 11	0.00	0.00	735.00	82.60	68.37	0.00
11 - 12	77.13	0.00	136.70	82.60	59.83	0.00
12 - 13	86.82	0.00	94.00	82.60	128.20	0.00
13 - 14	59.83	0.00	68.40	88.32	940.17	0.00
14 - 15	410.24	0.00	213.70	88.32	39.80	0.00
15 - 16	264.94	37.00	145.30	88.32	39.80	0.00
16 - 17	401.70	37.00	504.30	187.79	39.80	0.00
17 - 18	34.21	37.00	444.40	187.79	1153.80	119.20
18 - 19	0.00	675.20	34.10	85.46	1299.10	119.20
19 - 20	662.40	675.20	177.70	85.46	119.65	113.70
20 - 21	662.40	0.00	504.30	85.10	145.29	113.70
21 - 22	128.20	0.00	453.00	388.68	153.88	
22 - 23	256.40	0.00	427.30	388.68	1033.74	
23 - 24	743.40		119.60		1033.74	
24 - 25	735.00					



CUADRO 3.3C.: VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS AGUJEROS INYECTADOS

PROGRESIVA	As-377	As-378.5	As-380	As-381.5	As-383	A-384.5
PROF.PERF. (M)	24.00	21.00	24.50	21.00	22.00	21.00
TOT.CEM. (Kg)	5820.18	2986.96	3955.61	2825.02	5066.69	2506.09
TOT.BENT.(Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	32.22	16.62	21.96	15.73	28.08	13.91
HDR.SOD. (KG))	5.05	13.71	11.81	14.32	8.56	7.63
LIGNOULF (Kg)	1.50	4.33	3.52	4.53	2.71	2.33
TOT.INY.(Kg)	5858.95	3021.62	3992.90	2859.60	5186.04	2529.96
METROS INY.	23.00	20.00	23.00	20.00	21.00	20.00
PRO.INY/m.l.	254.74	151.00	173.60	142.98	243.14	126.50
CATEGORIA	T	C	S	C	T	C
1 - 2	68.55	48.7	58.2	58.2	86.4	0
2 - 3	23.1	341.6	339	331.6	26.15	82.9
3 - 4	23.1	341.6	339	331.6	112.49	82.9
4 - 5	87.85	172.05	128.35	128.45	140.49	77.02
5 - 6	113.85	172.05	136.75	128.45	114.6	77.02
6 - 7	26	25.63	8.4	100	112.24	142.82
7 - 8	43.30	25.63	8.4	100	112.24	142.82
8 - 9	239	202.27	180	100	606.81	56.34
9 - 10	247.8	202.27	423.6	74.1	606.81	56.34
10 - 11	418.8	202.27	423.6	74.1	55.55	99.7
11 - 12	316.2	170	137.4	74.1	55.55	99.7
12 - 13	76.9	170	111.1	128.2	170.9	84.05
13 - 14	170.9	170	111.1	128.2	170.9	84.05
14 - 15	213.7	37	85.5	128.2	170.9	62.7
15 - 16	196.5	37	1085.4	256.4	393.14	281.3
16 - 17	341.9	37	0	256.4	363.24	281.3
17 - 18	42.9	54.1	0	256.4	363.24	281.3
18 - 19	550.4	54.1	160.7	68.4	339.02	281.3
19 - 20	435.9	54.1	0	68.4	339.02	128.2
20 - 21	1085.4	504.25	0	68.4	339.02	128.2
21 - 22	777.8		213.7		427.33	
22 - 23	230.8		17.1			
23 - 24	128.2		25.6			

CUADRO 3.3D.: VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS AGUJEROS INYECTADOS

PROGRESIVA	As-386	As-387.5	As-389	As-390-5	As-392	A-393.5
PROF.PERF. (M)	22.00	21.00	23.00	21.00	22.50	20.00
TOT.CEM. (Kg)	36707.52	2799.35	2879.62	2962.79	7614.95	1669.54
TOT.BENT.(Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	203.18	15.56	16.02	16.52	42.21	9.27
HDR.SOD.(kg)	23.57	11.34	13.42	18.51	12.93	4.43
LIGNOULF (Kg)	7.04	3.39	4.00	5.53	3.86	1.32
TOT.INY.(Kg)	36941.31	2829.64	2913.06	3003.35	7673.95	1684.56
METROS INY.	21.00	20.00	22.00	20.00	21.50	19.00
PRO.INY/m.l.	1759.11	141.48	132.41	150.17	356.93	88.66
CATEGORIA	P	C	T	C	S	C
1 - 2	130.75	57.35	162.90	84.70	190.45	68.95
2 - 3	162.90	77.90	255.23	59.60	47.10	47.10
3 - 4	189.00	78.00	255.24	223.86	94.80	47.10
4 - 5	2494.83	115.70	89.60	274.67	358.60	87.60
5 - 6	2269.13	166.50	89.60	304.88	247.90	87.60
6 - 7	3292.48	185.64	86.40	233.12	0.00	0.00
7 - 8	4642.60	185.64	86.40	233.12	48.70	0.00
8 - 9	4770.20	115.38	299.13	166.67	1085.40	104.70
9 - 10	3059.03	115.38	299.13	166.66	1376.00	104.70
10 - 11	2862.43	125.35	495.70	0.00	255.00	55.50
11 - 12	3016.03	125.35	495.60	0.00	1350.50	55.50
12 - 13	2179.33	125.35	57.00	418.49	1367.50	125.35
13 - 14	196.60	39.90	57.00	418.79	34.20	125.35
14 - 15	488.90	39.90	57.00	0.00	42.70	125.35
15 - 16	488.90	39.90	0.00	0.00	0.00	0.00
16 - 17	729.30	233.60	0.00	0.00	59.80	0.00
17 - 18	729.30	233.60	0.00	0.00	0.00	136.75
18 - 19	729.30	256.40	19.70	0.00	0.00	216.52
19 - 20	1441.10	256.40	19.70	0.00	51.30	296.49
20 - 21	1713.60	256.40	19.70		611.10	
21 - 22	1355.60		68.03		453.00	
22 - 23			0.00			

CUADRO 3.3E.: VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS AGUJEROS INYECTADOS

PROGRESIVA	As-395	As-396.5	As-398	As-399-5	As-401	A-402.5
PROF.PERF. (M)	22.50	20.00	22.00	19.00	22.50	19.00
TOT.CEM. (Kg)	5262.45	2530.17	6665.45	2471.83	5209.85	819.59
TOT.BENT.(Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIKA (Kg)	29.16	14.10	36.96	13.70	28.98	4.68
HDR.SOD.(KG)	7.21	14.99	13.91	4.74	24.03	25.44
LIGNOULF (Kg)	2.15	4.48	4.15	1.41	7.00	1.52
TOT.INY.(Kg)	5300.97	2563.74	6720.47	2491.68	5269.06	851.23
METROS INY.	21.50	19.00	21.00	18.00	22.00	18.00
PRO.INY/m.l.	246.56	134.93	320.02	138.43	239.50	47.29
CATEGORIA	T	C	P	C	T	C
1 - 2	37.60	129.95	35.10	22.35	162.15	94.90
2 - 3	36.70	147.75	95.88	14.90	107.10	47.75
3 - 4	36.70	147.75	147.10	14.90	315.40	47.75
4 - 5	146.50	217.35	133.00	128.80	396.35	99.70
5 - 6	146.50	381.40	278.00	128.80	691.75	99.70
6 - 7	73.40	60.44	199.70	25.90	42.40	0.00
7 - 8	73.40	60.44	173.70	25.90	69.50	0.00
8 - 9	390.30	0.00	38.50	359.96	0.00	119.66
9 - 10	390.30	0.00	38.50	179.98	85.40	119.65
10 - 11	390.30	111.10	820.50	179.98	786.30	37.00
11 - 12	71.22	111.10	555.60	0.00	0.00	37.00
12 - 13	71.23	128.17	1000.00	0.00	136.80	37.00
13 - 14	71.23	128.77	307.70	0.00	1410.20	11.40
14 - 15	170.93	102.56	42.70	427.33	145.30	11.40
15 - 16	170.93	102.56	649.50	341.87	495.70	11.40
16 - 17	170.93	34.18	136.77	341.87	76.90	25.64
17 - 18	564.10	34.18	128.20	149.57	0.00	25.64
18 - 19	169.20	233.61	812.00	149.57	0.00	25.64
19 - 20	1205.10	433.03	418.80		25.60	
20 - 21	299.10		264.90		256.40	
21 - 22	615.30		444.40		65.81	

CUADRO 3.3F.: VOLUMENES DE INYECCION SEGUN LA CATEGORIA DE LOS AGUJEROS INYECTADOS

PROGRESIVA	As-404
PROF.PERF. (M)	48.00
TOT.CEM. (Kg)	ERR
TOT.BENT.(Kg)	0.00
SIKA (Kg)	55.65
HDR.SOD.(KG)	26.44
LIGNOULF (Kg)	6.41
TOT.INY.(Kg)	10117.45
METROS INY.	27.00
PRO.INY/m.l.	374.72
CATEGORIA	S
1 - 2	58.00
2 - 3	213.45
3 - 4	213.45
4 - 5	326.15
5 - 6	316.50
6 - 7	468.80
7 - 8	43.40
8 - 9	341.90
9 - 10	42.70
10 - 11	0.00
11 - 12	0.00
12 - 13	0.00
13 - 14	17.10
14 - 15	25.60
15 - 16	470.10
16 - 17	85.50
17 - 18	0.00
18 - 19	0.00
19 - 20	0.00
20 - 21	25.60
21 - 22	25.60
22 - 23	51.40
23 - 24	85.40
24 - 25	1705.00
25 - 26	1705.00
26 - 27	727.40
27 - 28	3169.40

### CUADRO 3.4.

VOLUMENES DE INYECCION EN LA CAMARA DE COMPUERTAS

210

N° SONDEO	PROFUND. M	INCLINA. VERT. (°)	VOL. TOT. INY. (kg)	VOL. INY/M
Dd-6	8.00	60	234.44	23.91
Dd-8	8.00	80	247.55	30.94
Dd-9	10.00	90	498.67	59.87
Dd-11	8.00	110	206.35	25.79
Dd-12	8.00	120	165.80	20.73
Dd-14	8.00	140	318.80	39.85
Dd-16	8.00	160	124.00	15.51
Dd-18	8.00	180	194.47	24.31
Dd-20	8.00	160	199.74	24.97
Dd-22	8.00	140	329.86	41.23
Dd-24	8.00	120	199.56	24.95
Dd-25	8.00	110	53.32	6.67
Dd-27	10.00	90	355.97	35.60
Dd-29	8.00	70	128.46	16.06
Dd-31	8.00	50	424.76	53.10
Du-6	8.00	60	164.95	20.62
Du-8	8.00	80	329.90	41.24
Du-9	10.00	90	152.80	15.28
Du-11	8.00	110	179.75	22.47
Du-12	8.00	120	582.58	72.82
Du-14	8.00	140	319.49	39.94
Du-16	8.00	160	253.40	31.68
Du-18	8.00	180	121.59	15.20
Du-20	8.00	160	217.04	27.13
Du-22	8.00	140	138.90	17.36
Du-24	8.00	120	234.41	29.30
Du-25	8.00	110	772.81	96.60
Du-28	8.00	80	429.74	53.72
Du-29	8.00	70	156.27	19.53
Du-31	8.00	50	95.48	11.94
D-2	8.50	20	104.02	12.24
D-3	8.30	30	1989.81	239.74
D-4	8.00	40	121.48	15.19
D-5	8.00	50	525.52	65.69
D-7	8.00	70	260.48	32.56
D-10	8.00	100	269.19	33.65
D-13	8.00	130	255.5	31.94
D-15	8.00	150	155.41	19.43
D-17	8.00	170	188.41	23.55
D-19	8.00	170	277.85	34.73
D-21	8.00	150	494.98	61.87
D-23	8.00	130	78.12	9.77
D-26	8.00	100	121.52	15.19
D-30	8.00	60	69.44	8.68
D-32	8.00	40	177.24	22.16
D-33	8.30	30	147.61	17.78
D-34	8.50	20	105.52	12.41

#### **4. Analisis de los Datos obtenidos en las Investigaciones Geognósticas e Inyección efectuadas**

Como se menciono anteriormente el diseño original, vario a medida que se fueron realizando los trabajos de inyección, ello debido principalmente a las bajas tomas, crecimiento de la pantalla, etc. en este capítulo también se hace un análisis final de la inyección, para las recomendaciones respectivas.

##### **4.1 ISOCURVAS DE PERMEABILIDAD:**

De los datos del item 3.2.2. se obtuvo la sección longitudinal SL-4.1. En ella se puede observar que las permeabilidades superan los 4 U.L. en su mayor parte excepto en zonas aisladas tales como en el taladro PC-1 tramo 64.20 - 64.50 y 68.50 - 70.50, en el taladro D-37 tramo 4.65 19.00, taladro A-2' tramo 83.65 86.65, taladro A-1 tramo 69.70 73.00, taladro As-0 tramo 22.00 25.00 y 31.00 34.00. Una apreciación importante se da en los taladros PC-1, A-2 y As-0 en los que las permeabilidades tienen una tendencia de disminuir paulatinamente a partir de las cotas 4211, 4209 y 4235.15 respectivamente. A su vez estos taladros son los más profundos. Se aprecia un área crítica en la

progresiva As-386 en la cota 4276.00 y 4267.00 m.s.n.m. en la que se tienen lugares superiores a 1000.

#### **4.2 ISOCURVAS DE VOLUMENES DE INYECCION:**

Con los datos del ítem 3.3.5-b y 3.3.6 se obtuvo la sección longitudinal SL-4.2, así como las figuras 4.1, que corresponde a un histograma de volúmenes de inyección por metro en cada taladro y la figura 4.2, que es la ubicación final de los hoyos primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios, en un diagrama P\*V depresión Vs volumen por metro. Los datos que se utilizaron para el último gráfico corresponden al cuadro 3.2 y 3.3 (promedio de inyección).

De la fig. 4.1 y de SL-4.2 se deducen que existen dos áreas bien marcadas de inyección, la primera va desde la progresiva As-350 hasta la As-366.5 y la segunda de As-368 hasta As-404. En la primera se observa un mayor volumen de inyección por metro, así tenemos que el taladro primario As-362 tiene un volumen de inyección de 1400 kg por metro, en general los valores son más altos comparándolos con los datos de la segunda área en los que disminuyen los promedios de inyección, teniendo una excepción en el taladro As-368 y As-386. Ambas zonas tienen las mismas características en común:

Los taladros primarios tienen un mayor volumen de inyección por metro, seguidos por secundarios, terciarios y cuaternarios, existen tres excepciones, son los taladros D-37, As-389 y As-404.

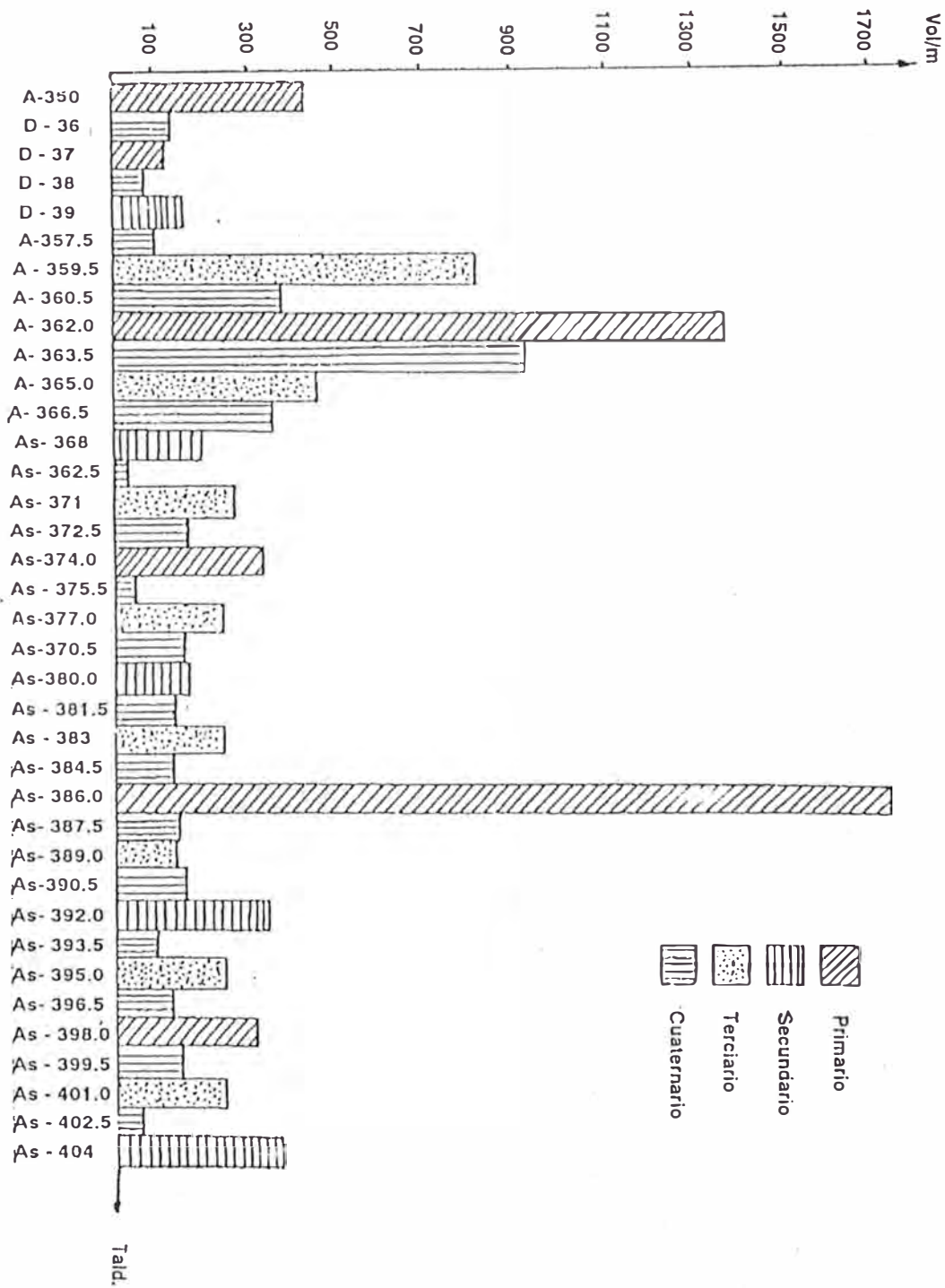


Fig. 4.1. Volumen promedio Vs. Progresiva



La presión promedio de inyección aumenta en cada categoría de los agujeros de inyección, tal como se aprecia en la figura 4.2, es decir la presión de inyección en los taladros primarios es menor que en los secundarios, y en los secundarios menor que en los terciarios, ocurriendo lo mismo con los terciarios y cuaternarios. Cabe mencionar que existen los taladros que escapan a esta característica, ello se debe a la existencia de áreas críticas de inyección, que serán detalladas en el ítem 4.6. En SL-4.2 se han tomado tres rangos. El primer rango se determina teniendo en cuenta el promedio de inyección total (350 kg) por metro lineal y la frecuencia y la frecuencia con que se presentan los datos. Estos tramos son:

0.00 a 400.00

400.00 a 1200.00

> 1200

El primer rango nos da áreas de baja inyección, que al compararlas con los datos de permeabilidad se observa que no en todas las áreas concuerdan con un valor inferior a los 4 Lugeones, como ocurre en el taladro As-362 (A-2) entre las cotas 4254 a la 4259 en la que el volumen de inyección promedio es de 44.65 kg/m.l y las permeabilidades superiores a 20 U.L. El segundo rango va de los 400 a 1200 kg/m.l y el tercer rango cuando es mayor a 1200 kg/m.l. Se ha considerado este último valor como crítico en base a que el volumen máximo de inyección de los taladros cuaternarios es de 1480 l, dándose 280 l, como un margen de seguridad.

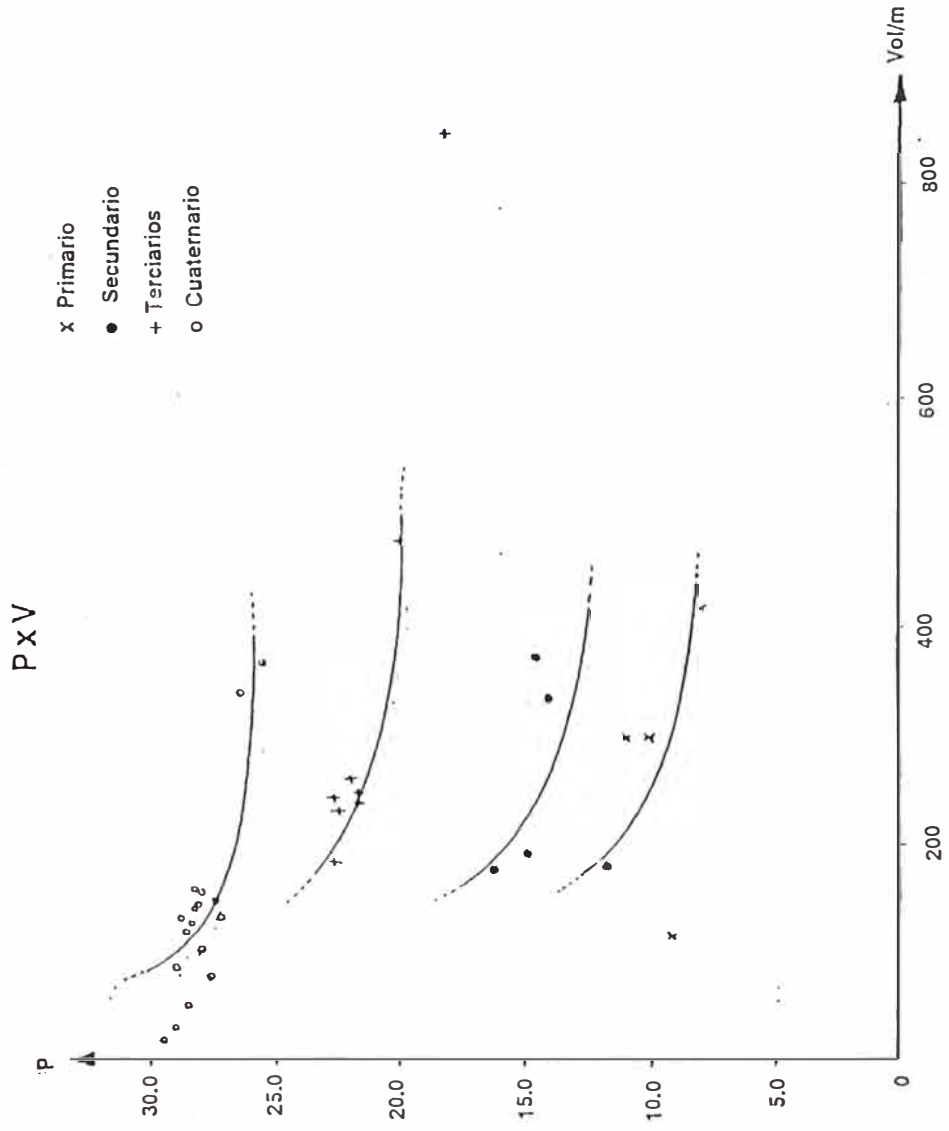


Fig. 4.2.

#### **4.3 ISOCURVAS DE LOS VALORES DE RQD:**

Con los datos de las tablas del ítem 3.2.2-c se obtuvo la sección longitudinal SL-4.3, en la que se presentan las curvas isovalóricas del RQD en el tramo de estudio. En los taladros más profundos se aprecia que los valores van aumentando a medida que se profundiza la perforación y cuando el taladro se ubica más hacia la derecha. Se han considerado cuatro rangos: Roca muy mala con RQD inferior a 20, roca mala con RQD entre 20 y 40, roca regular a buena con RQD entre 40 y 60 y roca muy buena con RQD mayor a 60.

#### **4.4 ISOCURVAS DE LOS VALORES DE LAS CARACTERISTICAS**

##### **GEOMECANICAS:**

El fracturamiento y la alteración es la característica más importante, por lo que se han elegido como los parámetros de estudio. Cabe mencionar que las características de dureza no se han tomado en cuenta porque la roca tiene valores altos en lo que respecta a ella, como se observa en el ítem 3.2.2-d. Ello hace deducir que este factor no es determinante en la inyección.

##### **4.4.1. ISOVALORES DE ALTERACION:**

De los datos obtenidos en las perforaciones de investigación se deduce la sección longitudinal SL-4.4, de lo cual se deduce que la alteración en la roca va de moderadamente alterada (A-3 - A-5).

En general la roca mejora ligeramente a partir de la cota 4220 hacia abajo. En la zona superior izquierda de la sección longitudinal, se aprecian dos zonas en las cuales la roca no se halla alterada, teniendo en ello valores bajos de permeabilidad, RQD y volúmenes de inyección. Al comparar la sección SL-4.4 con el plano 3.1, se determina que los valores más altos de alteración se presentan en la toba dacítica blanca con alto contenido de feldespatos y presencia de poros especialmente en los contactos entre paquete y paquete nos llevan a la conclusión que la roca ha sido inicialmente alterada por la presencia del nivel freático; recordar que este se halla a 4275 msnm, y ha sido posteriormente lavada.

#### **4.4.2. ISOCURVAS DE FRACTURAMIENTO:**

De los cuadros del ítem 3.2.2-d y la sección longitudinal SL-4.5, se deducen que existen zonas muy fracturadas hasta una profundidad aproximada de 70 m, en la que los promedios van de F-4 a F-5. pasados los 70 m la roca mejora ostensiblemente con los valores que van de F-3 a F-2. Como se puede observar de SL-4.5 aquí ocurre lo mismo que en las características anteriores, es decir la roca mejora sus condiciones en profundidad y hacia la derecha. Se han asumido tres rangos que son de F-1 a F-2, F-3 y de

valores mayores de F-4. Se han determinado tres sistemas principales de discontinuidades:

$$S_1 = N31^\circ W \quad 75^\circ NE$$

$$S'_1 = N31^\circ W \quad 45^\circ SW$$

$$S_2 = N45^\circ E \quad 78^\circ NW$$

De ellos  $S_1$  y  $S'_1$  se hallan normalmente abiertas y rellenas de arcilla, mientras que  $S_2$  es de menor abertura con un relleno más resistente, como se puede apreciar en el cuadro 4.1A.

#### **4.5 Diseño Definitivo de las inyecciones en la pantalla de impermeabilización.**

Al realizar una comparación del diseño original (ver 3.3.3.) con el definitivo, se observa que existen ligeras diferencias, específicamente en lo que respecta a las profundidades de los taladros con la Galería de investigación y en la ubicación de los mismos ( cámara de compuertas), como veremos a continuación. Cabe mencionar que el tipo de mezclas presiones y volúmenes de inyección se han mantenido durante todo el proceso de inyección.

##### **4.5.1. Ubicación y descripción de los agujeros de inyección en la Cámara de compuertas:**

Como se puede apreciar en los datos de volúmenes de inyección (Cuadro 3.4) las tomas en estos taladros son bastante bajas, con valores que varían entre 6.66 y 248.76 Kg/mt. Esta fue la razón principal por la cual se

CUADRO 4.1.A.: CARACTERISTICAS GEOMECANICAS DEL MACIZO ROCOSO EN EL TRAMO DE ESTUDIO

TALADRO	D - 37	A - 2	A - 2'	A - 1	As - 0
CARC PROF	S T A R C	S T A R C	S T A R C	S T A R C	S T A R C
0 - 3		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3 S <sub>3</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 4 4 3 - 1 1 4 3
3 - 6	S <sub>1</sub> 3 4 - - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 3 3 1	S <sub>1</sub> 3 4 8 3 S <sub>2</sub> 2 6 4 3
6 - 9	S <sub>1</sub> 3 7 - - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - - 1 1 8 3 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 3 3 1 - 1 1 8 1	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3
12 -15	S <sub>1</sub> 3 7 - - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 3 S <sub>2</sub> 2 5 8 2	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 3 3 1	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3
15 -18	S <sub>1</sub> 3 5 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 5 8 1	S <sub>1</sub> 3 7 1 - - 1 1 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 4 3 2	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3
18 -21	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 2 - - 1 1 8 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 5 4 2 S <sub>2</sub> 2 5 3 2	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3
21 -24	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 2 -	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 - 1 1 8 2 S <sub>2</sub> 2 6 4 3	S <sub>1</sub> 3 5 4 2 S <sub>2</sub> 2 5 3 2	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 4 3
24 -27	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 6 4 3 - 1 1 8 3	S <sub>1</sub> 3 7 1 - S <sub>2</sub> 2 6 2 -	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 5 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2
27 -30	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 4 3 2	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 6 2 - - 1 1 8 1	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2
30 -33	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 4 3 2	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 3 3 -	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2
33 -36	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 4 3 2 - 1 1 4 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 3 3 1 - 1 1 8 1	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2
36 -39	S <sub>1</sub> 3 7 - - S <sub>2</sub> 2 4 3 2	S <sub>1</sub> 3 5 4 3 S <sub>2</sub> 2 4 3 2	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2
39 -42	S <sub>1</sub> 3 7 - - S <sub>2</sub> 2 4 4 3	S <sub>1</sub> 3 7 - - S <sub>2</sub> 2 4 6 3	S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2		S <sub>1</sub> 3 4 8 1 S <sub>2</sub> 2 6 3 2

CUADRO 4.1.B. : DESCRIPCION DE LA SIMBOLOGIA UTILIZADA EN EL CUADRO 4.1.A.

TIPO (T)	ABERTURA (A) MM	RELLENO (R)	CONSISTENCIA (C)
0 ZONA DE FALLA	1 ANCHO (>200)	1 SIN RELLENO	1 DEBIL
1 FALLA	2 MOD. ANCHA	2 DESCOLORACION	2 MOD. RESISTENTE
2 FRACTURA	(60 - 200)	3 NO COHESIVO	3 RESISTENTE
3 SEUDOESTRATIF.	3 MOD. ANGOSTA	4 COHESIVO	4 MUY RESISTENTE
	( 20 - 60)	5 CEMENTADO	
	4 ANGOSTA	6 CALCITA	
	( 6 -20)	7 CLORITA, TALCO	
	5 MUY ANGOSTA	8 OTROS	
	( 2 - 6)		
	6 EXT. ANGOSTA		
	(< 2)		
	7 CERRADA		

## DISCONTINUIDADES (S)

RUMBO	BUZ.
$S_1 = N45^\circ W$	75° NE
$S_1 = N45^\circ W$	45° SW
$S_2 = S75^\circ W$	81° NW
$S_3 = N45^\circ W$	78° NE

varía el diseño esta decisión se toma luego de haberse inyectado el taladro ( Dd-9 Dd-27 y Dd-18 en la línea aguas abajo y Du-9 , Du-28 y Du-18 en la línea agua arriba. En los resultados de estos datos se realizo un nuevo diseño, el cual consiste en anular algunos taladros de las filas iniciales (Dd y Du), creando una nueva fila (D) de tal manera que se tiene un taladro D donde se han anulado los taladros anteriores ( Ver Plano 4.1)

#### **4.5.2. Ubicación y Descripción de los agujeros de inyección en la Galería de Investigación.**

En esta zona se replanteó la profundidad de los taladros, ello se debio a que las perforaciones exploratorias, determinaron la presencia de un fracturamiento mayor al esperado, como se puede apreciar en la Sección Longitudinal SL-4.4, en la que se observan valores de fracturamiento que oscilan entre F-4 y F-5 hasta la cota 4220 msnm aproximadamente. Otro factor concluyente fue la alta permeabilidad que supera ampliamente los cuatro lugones, que es el máximo permitido, como se aprecia en la Sección Longitudinal SL-4.2. Por otra parte el RQD en zonas inferiores a la pantalla de inyecciones, inicialmente proyectada tiene valores inferiores a 40 unidades, lo cual clasifica la roca como mala a



muy mala. Esto ocurre en áreas ubicadas por debajo de la cota 4225 msnm.

Estas características condujeron a que la pantalla de impermeabilización se profundizara en un 15% más de la proyectada inicialmente (Ver Plano 4.2), es decir el límite de pantalla ya no sería en la cota 4266.5 msnm en la progresiva As-404 sino será de 4253 msnm. A pesar de que la roca mejora por debajo de esta última cota no se ha creído conveniente el profundizar más la pantalla.

#### **4.6 AREAS DE INYECCION:**

Las apreciaciones de este ítem están basadas directamente en los datos de los volúmenes de inyección del ítem 3.2.2-b y de los gráficos correspondientes deducidos de éstos. De las secciones SL-1, SL-3, SL-4 y SL-5 se han extraído un área limitado en sus extremos por las progresivas As-350 y As-404, mientras que en su parte inferior su límite es la cota 4240 msnm, a las cuales se les ha denominado SL-1', SL-3', SL-4' y SL-5'. Se han determinado básicamente tres áreas de inyección que se describen a continuación.

##### **4.6.1 AREAS CRITICAS DE INYECCION:**

Se han ubicado tres zonas críticas principales de inyección cortados por los taladros As-362 y As-386 los mismos que tienen promedio de inyección de 1400 y 1700 l/m respectivamente. En estas dos zonas las permeabilidades son altas. Al hacer una

comparación de las secciones SL-1' y SL-2, podemos observar que en las áreas de mayor permeabilidad el volumen de inyección también aumenta, aunque es sabido por la práctica que una alta permeabilidad no necesariamente origina un alto volumen de inyección, ello depende del estado de las fracturas y su relleno. Estas áreas críticas corresponden a un mayor fracturamiento de la roca (entre F-4 a F-5), encontrándose las fracturas abiertas con relleno de arcilla débil, producto de la alteración de la roca por la presencia de aguas subterráneas, como se aprecia en la cuadro 4.1. En ella también se aprecia que los sistemas  $S_1$  y  $S_1'$  son los que normalmente se hallan más abiertos con un relleno fácil de ser lavado o reemplazado por la mezcla de inyección. Este estado de las fracturas se debe a que se halla cerca del eje del sinclinal (para las áreas críticas ubicadas en el taladro As-362) o cercanos a una falla. Así mismo se ha determinado que todas estas zonas tienen permeabilidades superiores a 50 UL y un RQD inferior a 40. Otras áreas críticas de inyección son las que se presentan esporádicamente en los paquetes de tobas dacíticas blancas, ello se debe a que estos presentan una porosidad secundaria; especialmente en los contactos de pseudoestratos, debido a la alteración de los feldespatos y su posterior lavado por las aguas subterráneas.

#### 4.6.2 AREAS MEDIAS DE INYECCION:

Estas generalmente se hallan por debajo de la cota 4260. Estas áreas poseen un RQD superior a 20 y una permeabilidad entre 4 y 50 UL. Al hacer una comparación con la sección geológica 3.1 se aprecia que estas áreas corresponden en su mayor parte a los tufos dacíticos en el cual la alteración es importante ya que es superior a A-3. En estas áreas las fracturas van de angostas a muy angostas con un relleno cohesivo para el sistema  $S_1$  y  $S_1'$ , mientras que el sistema  $S_2$  normalmente se halla extremadamente cerrada con un relleno no cohesivo y ligeramente resistente (ver cuadro 4.1). Otra zona importante es la que circunda a la zona crítica del taladro As-362, debiéndose a la presencia del sinclinal ubicado en esa área.

#### 4.6.3 AREAS DE MINIMA INYECCION:

Ocupan gran parte de la zona de estudio. En general el RQD es mayor a 20 y el fracturamiento oscila entre F-4 y F-5. Las fracturas están normalmente cerradas ( $S_1$  y  $S_1'$ ) o se hallan con un relleno cohesivo y resistente ( $S_2$ ), como se puede apreciar en el cuadro 4.1.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

### 5.1 CONCLUSIONES:

Del presente estudio se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. La elección de la ubicación de la presa se basa en longitud de la cerrada y en la presencia de un depósito lagunar de muy baja permeabilidad ( $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  UL). Considero que la zona no ha sido la más adecuada ya que la roca de la margen derecha se encuentra demasiado fracturada con permeabilidades que van de  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  UL, mejorando ligeramente a 70 metros de profundidad, hallándose a 100 m buena roca. Además el depósito denominado morrena frontal tiene una permeabilidad muy alta ( $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  UL). Una posible zona para la construcción de la presa pudo haber sido a 3 km. aguas abajo del eje de presa en donde se tiene roca en ambos flancos del río, la roca se halla meos fracturada y una cerrada de de unos 250 mt. aproximadamente.
2. La llamada morrena frontal en realidad es un depósito fluvio-glaciar, y para su tratamiento debería de considerársele como tal.

3. En general las laderas, tanto del sitio de presa como del embalse son estables, a excepción de la margen izquierda en donde se ha ubicado un deslizamiento antiguo de unos 200 m de longitud y a 800 m aguas arriba del eje de presa. Este deslizamiento se halla por encima de la cota máxima de embalse. Otro deslizamiento es el ubicado en el mismo eje de presa en la margen izquierda. Al parecer ambos deslizamientos no presentan mayor riesgo de reactivación, durante el vaciado rápido del agua.
4. En líneas generales la permeabilidad del embalse se halla dentro de la permitida, pero se debe tener en cuenta el área descrita ubicada entre los 500 a 900 m aguas arriba del eje de presa en la que se han ubicado signos de infiltración.
5. El método P\*V tiene la ventaja del control del volumen de inyección es decir se inyecta solamente lo necesario y en áreas cercanas a la pantalla de inyecciones. Para ello se controla la presión de inyección y el caudal. En este método se debe ir aumentando la presión de inyección, ya que al utilizarse una mezcla densa ésta tiende a aumentar su cohesión muy rápidamente.
6. La elección de las presiones, volúmenes y tipos de mezclas varían de obra en obra, e inclusive en una misma zona se pueden utilizar diversas presiones y tipos de mezcla, esto se debe a que la inyección está íntimamente ligada a las condiciones geológicas del macizo rocoso o suelo, siendo por ello indispensable

el tener un laboratorio de inyecciones en obra que esté constatemente realizando pruebas de inyección hasta lograr la mezcla más adecuada. Las inyecciones en roca son netamente experimentales debido a la heterogeneidad de los factores que influyen en su colocación.

7. Los resultados que se obtienen en el laboratorio son inicialmente referenciales, debido a que las condiciones del terreno a inyectar no se pueden reproducir, pero son muy importantes porque son el punto de partida de las inyecciones en cualquier proyecto.
8. Los taladros primarios son los que poseen un mayor volumen de inyección por metro, seguido de los taladros secundarios, terciarios y cuaternarios, esto es debido a que el método P\*V contempla diferentes valores de volúmenes de inyección para cada tipo de taladro, siendo descendente a partir de los taladros primarios. Una segunda razón es que a medida que se va realizando la inyección las fracturas van siendo rellenadas dejando menos espacio para las subsiguientes inyecciones que se realizan cerca a dichas fracturas.
9. En el tramo de estudio la roca mejora su calidad a partir de los 70 m de profundidad y a los 100 m ésta es bastante aceptable.
10. En muchos de los taladros se aprecia que en los cinco primeros metros los volúmenes de inyección son ligeramente superiores al promedio del taladro, eso se

debe al fracturamiento producido por la detonación del explosivo durante la excavación del túnel, esto podría evitarse mediante una voladura controlada, para lo cual se debe de realizar un estudio en perforación y voladura.

11. Se demuestra que no existe una relación directa entre la permeabilidad y los volúmenes de inyección, sin que ello quiera decir que aquella sea un parámetro inexacto de control, siendo hasta hoy uno de los pocos medios prácticos sencillos y de bajo costo que nos determinan la calidad de la inyección.
12. Los sistemas principales causantes de los mayores volúmenes de inyección son S1 y S1' ubicándose en zonas cercanas al sinclinal o fallas, en la que estos sistemas se hallan más abiertos y con un relleno no cohesivo y débil, como se puede apreciar en las áreas críticas ubicadas en los taladros As-362 (A-2) y As-386 (A-1) cuyas cotas son superiores a 4265, mientras que para las áreas críticas ubicadas por debajo de dicha cota se les encuentra en los paquetes de toba dacítica las mismas que se encuentran de moderadamente a muy alteradas, esto se debe a que el nivel freático se ubica en la cota 4275, teniéndose fracturas abiertas y con un relleno de arcillas producto de la alteración de la roca. Es importante destacar que esta roca tiene una mayor porosidad secundaria producto del lavado de la arcilla que ha rellenado las fracturas existentes.

13. Las áreas de inyección intermedia se hallan principalmente por debajo de la cota 4260, que geológicamente pertenecen a la toba dacítica cuya alteración es superior a A-3. Por encima de la cota mencionada las áreas de inyección intermedia son circundantes a las áreas críticas.
14. Las zonas de baja inyección se encuentran dispersas en toda la zona de estudio. Presentan fracturas cerradas o contienen un relleno cohesivo y resistente.

## 5.2 RECOMENDACIONES:

1. Se recomienda realizar un estudio en las áreas de deslizamientos. El riesgo de reactivación es mínimo pero una saturación del material podría ser peligroso para la seguridad de la presa. En este estudio se debe determinar la superficie del deslizamiento, sus límites, volumen, permeabilidad, etc. Este estudio también debe abarcar al depósito fluvio-glaciar, con el fin de determinar exactamente su origen, ya que existe la posibilidad que sea proveniente de un deslizamiento.
2. Realizar en el vaso un estudio que determine el riesgo de infiltración desde los 500 a 900 m del eje de presa, así como la posibilidad de tener áreas con karstificación. Es importante dejar en claro que el autor del presente informe no ha realizado un estudio profundo en este aspecto, pudiendo ser su apreciación susceptible a ser rebatida.



3. Para determinar las presiones de rechazo se debe de considerar la altura máxima a la cual se hallará el espejo de agua y no solamente la cota del punto inyectado proyectado en la superficie del terreno.
4. Para un mejor control de las inyecciones se recomienda agregarle a la mezcla un colorante, con la finalidad de que sea apreciada en las fracturas del testigo obtenido en la perforación de control.
5. Para tener una mejor información del terreno inyectado y a la vez realizar un control de la inyección, se recomienda para trabajos futuros ejecutar en los taladros cuaternarios pruebas de permeabilidad y perforar con recuperación de testigos.
6. Cuando se realice el cierre de pantalla, que se ubica al lado derecho adyacente a la zona de estudio, se debe poner especial interés cuando se inyecten los paquetes de tobas dacíticas y zonas de fallas.
7. En el tramo de estudio se deben de realizar tres perforaciones de control cuyas características son:

- El primero ubicado en la progresiva As-368 con  $75^\circ$  respecto a la vertical, con dirección  $S19.75^\circ W$ , una longitud de 25 m y a 0.5 m aguas arriba del eje de pantalla, con el fin de cortar a las discontinuidades  $S_1$  y  $S_2$ .

Un segundo taladro ubicado en la progresiva As-354, con  $35^\circ$  respecto a la vertical, de  $N 19.75^\circ E$  de dirección, una longitud de 45 m y a 0.5m aguas abajo del eje de pantalla con la finalidad que

determine la inyección en las discontinuidades  $S_1'$ , las fallas ubicadas en el área y el paquete de toba dacítica.

El tercero ubicado en la progresiva As-380 con un ángulo de  $35^\circ$  con la vertical, de N  $19.75^\circ$ E de dirección una longitud de 30 m y a 0.3 m aguas arriba del eje de pantalla, con la finalidad de investigar la inyección realizada en el taladro As-386 y la toba dacítica.

## REFERENCIAS

1. Blonc B. y Farfan M (1983) "Geología y Sismología". Vol VI, Presa Yuracmayo - Estudio de factibilidad. Electrolima - motor Columbus (Baden Suiza) Motlima Consultores S.A. (Lima Perú).
2. Steiger R, Moril E. Farfan M. (1983). "Geotecnia y Materiales" Vol Vii Presa Yuracmayo Estudio de Factibilidad Electrolima - Motor Columbus (Badem - Suiza) - Motlima Consultores S.A. (Lima - Perú)
3. Humberto Salazar Diaz. Levantamiento Geologico. En la hoja de Matucana - Ingemmet. 1983.
4. Fausto liñan 1992. Estudio de estabilidad de taludes de la Presa Yuracmayo S & Z Consultores Asociados
5. Diseño de Presa Vol XII. Presa Yuracmayo- Estudio de Factibilidad Electrolima - Motor Columbus (Baden - Suiza) Motlima Consultores S.A. ( Lima - Perú).
6. Henry Cabefout -Perforaciones y sondeos 1969

7. Jorge Ramírez- práctica pre-profesional. Construcción de la Pantalla de Impermeabilización del proyecto Presa Yuracmayo. Lima 1992.
8. Engo Leonardo L. Redaelli (1983). Consolidación en suelos y rocas con inyector- Asociación Brasileira de Geologia de Enseñanza traducdo 11-1983.
9. Gilg B, "L" ecran de inyection de mattmark prejet, exeation, controles, lous des premieres mises eneau", dixieme congres international des grands barrages Montreal 1970, vol II, Q-37, pp 174-177.
10. Sobarly F, "informe Nro 3, PH. Chicoosen, Chis. Informe de Geoconseil a C.F.E. y grupo de consultores, chicasén, mexico 1978
11. Sobarly F, "les inyections et les drainages de fundation de barrages en roches peu permeables". Geathechnique, 1968, Vol XVIII, Pp. 239-242.
12. B y G Lombardi & D. Deeve. Grouting Design and control using the Gin principle". Watter Power & Dan construction june 1993.
13. Riviere y Lescail. "Rapport convermant les travaux d' etanchement de la retenae de pamennagement de charmine - moux. V congreso de las grandes presas. París 1955 Duest 16-P.76.

14. Florentin y G. L'Heriteau (1950). Le coulis de ciment thermocolloidal et ses possibilites d'aplication aux injectivas, oaux travaux routiers, etc. Coloquio Internacional de Mécanica Racional. Poitiers. Abril 1950.