

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UNA PRESA EN EL ESTADO DE MORELOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

CÉSAR AGUSTÍN GONZÁLEZ SAUCEDO

DIRECTOR DE TESIS

M. I. HÉCTOR SANGINÉS GARCÍA



MÉXICO D. F. OCTUBRE 2010



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Como testimonio de gratitud ilimitada por su apoyo, aliento y estímulo, mismos que posibilitaron la conquista de esta meta: mi formación profesional.

Con admiración y respeto:

A mi Madre, por su cariño, guía y consejo. A mi Padre, por su trabajo y esfuerzo. He llegado a realizar la más grande de mis metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir. Una muestra de mi cariño y agradecimiento también a mis hermanos. Este logro mío, es también logro suyo.

En reconocimiento a mis Abuelos, Rosa y Albino, por el gran apoyo brindado durante los años más difíciles y más felices de mi vida y a través de mis estudios, y con la promesa de seguir siempre adelante.

A mi Esposa con profundo amor, por estar a mi lado, por su comprensión y tolerancia, que me alentaron a lograr esta hermosa realidad.

A mi Hija que está por nacer, porque su presencia en mi vida ha sido y será siempre el motivo más grande que me impulse a convertirme cada día en un mejor ser humano.

A mi Maestro y Amigo, el Ingeniero Sergio R. Herrera Castañeda, por haber significado la inspiración que necesitaba para terminar mi carrera profesional, prometiendo superación y éxitos sin fin, para devolver el apoyo brindado, y la mejor de las ayudas que puede haber. Su ejemplo constituye un aliciente para continuar con mi superación.

Al M.I. Héctor Sanginés García, por haber aceptado ser mi director de tesis, y a mis sinodales, M.I. Arturo Nava Mastache, Ing. Héctor Javier Guzmán Olguín, Ing. Norma Legorreta Linares, e Ing. Araceli Angélica Sánchez Enríquez, les agradezco a todos la orientación que me han otorgado para poder finalizar esta tesis.

A mis Amigos Marcos, Santiago y Rafael, que siempre dieron lo mejor de sí mismos sin esperar nada a cambio. Por saber escuchar y brindar ayuda cuando fue necesario.

He llegado al final de este camino y en mí han quedado marcadas huellas profundas de todos ustedes durante éste recorrido.

" Estar preparado es importante, saber esperarlo es aún más, pero aprovechar el momento adecuado es la clave de la vida." Arthur Schnitzler

"Sólo triunfa en el mundo quien se levanta y busca a las circunstancias y las crea si no las encuentra."

George Bernard Shaw

INTRODUCCIÓN

1.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	3
2.	GEOLOGÍA GENERAL	10
2.1	GEOLOGÍA DE LA BOQUILLA	14
3.	EXPLORACIÓN DE LA CIMENTACIÓN	20
3.1	PRUEBAS DE PERMEABILIDAD	27
4.	PROPIEDADES DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS	34
4.1 4.2	ESTUDIOS GEOFÍSICOS UNIDADES LITOLÓGICAS	35 51
5.	TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN	59
 5.1. 5.2. 5.3. 5.4. 5.5 5.6 	EXCAVACIÓN Y PREPARACIÓN EN LA CIMENTACIÓN DE LA PRESA PANTALLA IMPERMEABLE PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN Y TÉCNICA MANGUITOS DISEÑO DE LA MEZCLA RESULTADOS DE INYECCIÓN VERIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO	60 62 64 68 75 92
6.	CONCLUSIONES	96

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

No cabe duda de la trascendencia del agua para el sustento de los seres vivos y el desarrollo de las actividades humanas; dichas actividades quedan restringidas por la distribución geográfica del agua en nuestro país, existiendo así zonas que sufren la constante escasez de este elemento con todas las consecuencias que esto arrastra, pérdida de cosechas, enfermedades, muerte del ganado, etc. De aquí nace la necesidad del hombre de almacenar agua durante las épocas de lluvia y así poder aprovecharla en épocas de estiaje.

Por ello es de gran importancia el buen aprovechamiento de los recursos hidráulicos, para poder sustentar las diversas actividades del hombre. En este ámbito las presas de almacenamiento cumplen una función especial, siendo utilizadas no solo para el control de avenidas, sino también como fuentes de suministro de agua potable, generación de energía eléctrica y riego agrícola.

Previo a la construcción de una presa es necesario el estudio geológico completo tanto regional como de detalle, que permita definir las unidades litológicas que conforman la boquilla y el vaso, además de las características estructurales y de permeabilidad de las rocas.

Dependiendo de las características geológicas del sitio y del tipo de la cortina que se construirá, se determina el tratamiento de la cimentación; el objetivo de dicho tratamiento es el de lograr una superficie de apoyo estable y de baja deformabilidad, con objeto de poder garantizar el seguro funcionamiento de la obra. Éste tratamiento debe incluir también los procedimientos necesarios para reducir el flujo de agua debajo de la cortina, entre los que se encuentra el inyectado de la pantalla.

1

Para la planeación del tratamiento de inyección, también es necesario tomar en cuenta el tipo de uso que se le dará a la obra, así como su volumen de almacenamiento, para conocer hasta que grado es posible aceptar pérdidas por filtraciones esto es, una permeabilidad tolerable, que no influya en el funcionamiento y estructura de la obra.

La presa (Socavones) se construyó en la zona nororiental del estado de Morelos, muy cerca del límite estatal con el estado de Puebla, sobre el cauce del arroyo Amatzinac, en la colonia Popotlán del poblado de Temoac que es la cabecera del municipio del mismo nombre. Ya iniciada la construcción de la presa surgieron incertidumbres con relación al espesor real y a las propiedades de los materiales aluviales sobre los que se edificó la presa en el cauce del arroyo, por lo que se consideró conveniente complementar la exploración de los mismos mediante métodos geofísicos indirectos que dieran información de sus propiedades de compacidad respecto a las de la roca circundante, así como de la profundidad del contacto del aluvión con la roca y la definición de los parámetros elastodinámicos que permiten efectuar los análisis sísmicos requeridos para la revisión del diseño de la cortina.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

El escurrimiento de las aguas superficiales en el Estado de Morelos ocurre en dos subcuencas que forman parte de la gran Cuenca del río Balsas: la subcuenca del río Amacuzac que se extiende sobre un 83% del territorio, y al oriente del Estado, la subcuenca del río Nexapa que ocupa el 17% restante del territorio. Es en la segunda en donde el Gobierno del Estado de Morelos, a través de la Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente (CEAMA) y en coordinación con la Comisión Nacional del Agua, ha decidido realizar un sistema de presas de almacenamiento con el objeto de aprovechar los escurrimientos del arroyo Amatzinac que escurre por la Barranca de Amatzinac, para el aprovechamiento del agua para el riego de 750 ha.

El sistema de aprovechamiento del escurrimiento superficial se conforma, de aguas arriba hacia aguas abajo, de las presas de almacenamiento de Barreto, Socavones, Amilcingo, Jantetelco y Abrevadero. El sitio se localiza en el Municipio de Temoac, como se muestra en la figura 1, y se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 18 ¹Cuenca del río Balsas, en la subcuenca del río Nexapa, con coordenadas geográficas² 18°35′47" latitud norte y 98°46′32" longitud oeste. El arroyo de Amatzinac, es una corriente con escurrimiento de tipo perenne y capta los escurrimientos provenientes de las laderas del estrato-volcán Popocatépetl, y aguas abajo de la presa de almacenamiento (P.A.) Abrevadero, desagua en el río Nexapa, que a su vez desemboca en el río Balsas, en el territorio cercano a los límites de los estados de Morelos y Puebla.

¹ Comisión Nacional del Agua. Boletines Hidrológicos

² Carta Topográfica INEGI, Estado de Morelos.



Figura 1. Localización del municipio de Temoac, Estado de Morelos.

En la figura 2 se muestra la ubicación de los sitios, en orden de aguas arriba hacia aguas abajo, de las cinco presas de almacenamiento que conforman el Sistema de P.A. de la Barranca de Amatzinac³: Barreto, Socavones, Amilcingo, Jantetelco y Abrevadero.

³ Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente. (CEAMA)



Figura 2. Sistema de Presas de Almacenamiento que conforman la Barranca de Amatzinac: Barreto, Socavones, Amilcingo, Jantetelco y Abrevadero.

En la figura 3 se muestra la ubicación del sitio de la P.A. Socavones, a la cual se puede acceder a partir de la cabecera municipal de Temoac, entrando por la carretera principal hacia Zacualpan de Amilpas, y doblando a la derecha antes del Palacio Municipal de Temoac, hasta la calle Real en la Colonia Popotlán de Temoac, en donde se dobla a la izquierda y la calle termina en la entrada al camino de acceso al sitio de la presa en la Barranca de Amatzinac.



Figura 3. Localización del sitio de la P.A. Socavones, en Temoac, Mor.⁴

La P.A. Socavones que construyó la CEAMA, consta de una cortina de gravedad de mampostería con chapa de concreto en el paramento aguas arriba, la cual alcanza 17 metros de altura entre las elevaciones 1580 msnm y 1597 msnm, con longitud de corona de 77.8 m y longitud de desplante en el plano horizontal de 46 m sobre el cauce del arroyo Amatzinac. La cortina aloja un tubo de desvío de 1.5 m de diámetro en la margen izquierda del cauce en la elevación 1580.75, una obra de toma en la elevación del paramento aguas arriba y una galería de drenaje a lo largo de la cortina en su porción inferior. El vertedor de demasías es un Creager de cresta libre y está integrado en la cresta de la cortina en su porción media con una longitud total de 50 m y elevación del cimacio en la cota 1595 que

⁴ INEGI. Carta Topográfica 1:20,000 Morelos

corresponde con el NAMO⁵, quedando el NAME⁶ un metro por arriba de este último y un bordo libre de un metro. El NAMINO⁷ se ubica en la elevación 1585.50. El volumen de almacenamiento del vaso al NAME será de 165,000 m³ con el cual se pretenden regar 1,000 hectáreas ubicadas aguas abajo de la boquilla de la presa en el ejido de Temoac.

La CEAMA inició la construcción del Proyecto Ejecutivo de la Presa Socavones, que consiste en una obra de contención o cortina de la presa construida con mampostería junteada con mortero y desplantada dentro de una excavación de 70 x 17 m de dimensiones en planta y profundidad mínima de 3 m bajo el terreno natural del cauce, aunque nivelaciones a posteriori han mostrado que la profundidad de desplante es en promedio de 5 m y llega hasta 7 m en la margen derecha. La cortina de mampostería se desplantó sobre una losa de concreto simple con f'c=150 kg/cm² de 50 cm de espesor, con un dentellón de concreto f'c=200 kg/cm² de 250 cm de espesor situado al frente, aguas arriba. El nivel de proyecto de la rasante de desplante de la losa es la elevación 1577 msnm. El tipo de presa fue elegido considerando tres factores: (a) derrama económica en Temoac por adquisición de la mampostería y generación de empleo temporal para la mano de obra y operación de maquinaria y equipos durante la construcción; (b) a partir de un análisis de costos mediante la comparación con otros tipos de cortina; (c) que la construcción se realiza bajo el esquema de administración por la CEAMA.

Cabe mencionar que la presa con cortina de materiales térreos se descartó por resultar más honerosa, por lo que representa al costo de la obra de excedencias en los materiales de la Formación (Fm). Tlayécac, y por los sobreacarreos por las distancias a que se encuentran los materiales para construir tal cortina.

⁵ Nivel de Agua Máximo Ordinario.

⁶ Nivel de Agua Máximo Extraordinario.

⁷ Nivel de Aguas Mínimas de Operación.



Figura 4. Sección de la Cortina

Entre los aspectos de importancia para la presa, está el hecho de que se encuentra desplantada sobre un depósito de aluvión que a su vez descansa sobre las rocas no consolidadas de la Formación Tlayécac. Si bién la excavación para el desplante de la cortina permitió la remoción de un volumen importante del aluvión, el costo de extraer todo el volumen hubiese implicado realizar una excavación que en la parte central hubiese sido 12 m más profunda, es decir un volumen adicional de cuando menos 7000 m³ adicionales, que además hubiesen tenido que ser rellenados posteriormente con concreto o mampostería, lo que hubiese implicado un costo del orden de 60% mayor al de la opción elegida de cortina desplantada a la elevación 1577 msnm. sobre aluvión con construcción de una Pantalla Impermeable y Tapete de Consolidación.

Los trabajos de construcción han permitido obtener conocimientos más concretos y directos del terreno, y han permitido adaptar o ajustar y mejorar conforme progresa la construcción, tanto las especificaciones como las recomendaciones de construcción. Entre éstas, han emanado de la revisión del caso por parte de la CEAMA, diseñadores y consultores del proyecto, así como de especialistas de la Comisión Nacional del Agua, concluyéndose que para asegurar la correcta construcción y seguridad estructural de la presa, era necesario conocer mejor las propiedades mecánicas e hidráulicas del subsuelo, así como evaluar con mayor detalle el comportamiento geotécnico, hidráulico y estructural futuro de la presa, para lo cual se decidió efectuar estudios e investigaciones especiales complementarios, los cuales consisten básicamente en determinar propiedades mecánicas e hidráulicas de las formaciones geológicas del subsuelo y laderas en el sitio de la boquilla de la presa, y evaluar la seguridad estructural de la presa considerando la complejidad de la presencia de la estructura de contención en el ambiente geológico del sitio.

9

2. GEOLOGIA GENERAL

El estudio previo geológico del sitio describe lo siguiente: "La zona de estudio se encuentra en la cuenca geológica Morelos–Guerrero rodeada en sus porciones E-W y Sur por la Sierra Madre del Sur, y al Norte por el Eje Neovolcánico. Es atravesado en sentido E-W por la gran cuenca hidrológica del Río Balsas limitada al sur por el parteaguas de la Sierra de Guerrero y al Norte por la pendiente Sur del Eje Neovolcánico⁸.

Dentro de la región occidental que rodea al Volcán PopocatépetI se reconoce la Formación Tlayécac⁹ que se caracteriza por una secuencia de lodo o lahares. Esta formación aflora en los flancos inferiores del Volcán PopocatépetI y se caracteriza por estar formada de unidades constituidas por fragmentos de roca angulosos y subangulosos, con tamaños que varían de unos centímetros hasta 1 m con matriz de fino (limo y arcilla); se presentan lentes y capas interestratificadas de grava y arena que muestran la acción del agua, dando como resultado la presencia de acantilados en los bordes de las barrancas, debido a que el material no se encuentra cementado pero se encuentra bien consolidado (Fries, 1960).

Por encima de la formación Tlayécac se encuentran depósitos aluviales de material poco consolidado a no consolidado, cuyos clastos son de forma angulosa a subangulosa y el tamaño de estos fragmentos varían de gravas a finos, así como pequeñas cantidades de marga, turba y tierra diatomácea, ceniza volcánica, loess y travertino. Los fragmentos de roca compuestos de material volcánico cubren la superficie erosionada que permite hacer la diferenciación entre ambas unidades.

Dentro de los procesos que intervienen en la erosión e intemperismo de las rocas preexistentes, el escurrimiento de corrientes de agua y lodos durante el Terciario y

⁸ COREMI Consejo de Recursos Minerales. E14-B51 Y E14-B61

⁹ Dr. Carl Friers. Instituto de Geología de la UNAM

Cuaternario, dió lugar a la formación de barrancas, tal es el caso de la Barranca Amatzinac, cuyo cauce transporta el material que es depositado en las partes bajas y origina acumulaciones de tipo aluvial. Se presume que en el caso de los materiales en el sitio de la Barranca de Amatzinac, la acumulación de este material se formó principalmente al bloqueo del desagüe que se originó por los derrames de lava del grupo Chichinautzin. Figura 5.



Figura 5. Geología Regional.

SIMBULUGÍA						
ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS						
PQdcDepósitos clásticos de material volcánico que cubre superficies erosionadas principalmente en la formación Tlayécac (Pt); presente en la mitad oriental de la Hoja y de pocos metros de espesor; en las partes cortadas por barrancas, aflora la Pt debajo de PQdc; parcialmente contemporáneos con Dal						
Pt FORMACIÓN TLAYECÁC: Principalmente lahares o derrames de lodo derivados de PQp, con la cual está interdigitada en el norte; incluye capas lacustres sobre el bajo Río Chinameca, y algo de PQdc localmente, debido a la dificultad en separarla de los últimos sin fotografías.						
Derrames de lava con capas intercaladas de material volcaniclástico asociado; principalmente de composición intermedia, o sea andesita, dacita y riodacita. Mt GRUPO TEPEXCO: Corresponde a la parte suroriental de la ho in.						
Km FORMACIÓN MORELOS: Caliza y dolomita interstratificadas, con anhidrita presente localmente en la parte inferior, suele contener grandes foraminíferos de la familia Millolidae, así como rudístas y otros pelecípodos, aunque muchas capas no tienen fauna.						
ROCAS INTRUSIVAS Y METAMÓRFICAS						
Mgj GRANDDIDRITA JANTETELCO: Dos cuerpos grandes y otros dos pequeños intrusionados en el Grupo Tepexco (Mt) en la parte centrooriental de la Hoja.						
SÍMBOLOS						
Carretera pavimentada						
Corrientes importantes						
Camino carretero de tierra						
Sitios de importancia para el estudio geológico						
Poblaciones						

Descripción de unidades litológicas de la Figura 5 Geología Regional.

2.1 GEOLOGIA DE LA BOQUILLA.

En cuanto a los materiales de las laderas de ambas márgenes, se presenta el conglomerado típico de la Formación Tlayécac, es decir, fragmentos de roca, con predominancia de boleos, de roca volcánica, con piezas subredondeadas a redondeadas de 10 a 30 cm de diámetro, empacadas en una matriz de arena limosa con grava, cementada, consistente, y de alta a muy alta compacidad, resistiendo sin problema cortes verticales, e inclusive, en algunas partes se aprecian desplomes o recortes donde este deposito no consolidada se sostiene sin desprendimientos. En cortes de las laderas de la boquilla en ambas márgenes y en particular en la margen izquierda, se aprecia también un estrato de una brecha con piezas de roca volcánica, pero con predominancia de formas subangulosas, de 10 a 30 cm de diámetro, algunas intemperizadas, y todo el conjunto empacado en una matriz de arena limosa con grava, cementada, consistente, y de alta a muy alta compacidad, resistiendo los cortes verticales sin desprendimientos.

Con el avance de las excavaciones de la cortina en el cauce, se pudo apreciar que el subsuelo estaba constituido por un depósito aluvial de fragmentos de roca con tamaños predominantes de boleo (subredondeado a redondeado) con predominancia de los tamaños entre 10 y 30 cm de diámetro, aunque también se apreciaron fragmentos de roca mayores, algunos de hasta 1 m de diámetro. En ninguna de las márgenes del sitio de la boquilla y dentro de una franja de 100 m de ancho medida a cada lado del eje de la contención de la presa, se apreciaron fracturas o dislocaciones estratigráficas que estuviesen indicando la presencia de una falla geológica, aunque sí se tiene la evidencia clara de los diferentes flujos de lodo o lahares que dieron origen a la Fm. Tlayécac.

A continuación se describe con detalle la litología predominante en las laderas de

14

ambas márgenes y en el cauce donde se construyó la presa "Socavones", esta litología es representativa del depósito rocoso que aflora a lo largo de las márgenes de la Barranca de Amatzinac, distinguiéndose tres diferentes tipos de roca:

a) <u>Brecha volcánica</u>: oxidada de color gris oscuro en estado fresco, el cual se observa en los fragmentos de roca embebidos en la matriz y blanco a marrón cuando se encuentra intemperizada debido a la oxidación de los minerales ferromagnesianos que contiene la matriz. Los fragmentos de roca que contiene la masa presentan sus bordes de angulosos a subangulosos que varían en tamaño de 10 a 30 cm y se encuentran soportados por la matriz, que es una grava con arena limosa, poco arcillosa, de alta a muy alta compacidad, cementada y muy consistente. No se presentan estructuras internas dentro de la masa tales como imbricación o gradación. Los fragmentos de roca observables son de rocas andesíticas. Esta roca tiene orígen en los flujos de lodo provenientes de los eventos eruptivos del volcán Popocatepetl.

b) <u>Ceniza volcánica</u>; fina y arcillosa de color gris oscuro en la que predomina el tamaño arcilla con poca presencia de limos y arenas. El mayor tamaño de los granos de la ceniza es de 1/16 mm, dimensión que se empleó para clasificar al material como ceniza fina. Este tipo de material se puede interpretar como el depósito del flujo de lodo.

c) <u>Brecha volcánica</u>; con matriz de color pardo claro y fragmentos de roca de tono grisáceo. Presenta fragmentos de roca de diferentes tamaños predominando los de 10 a 30 cm, aunque pueden apreciarse tamaños mayores; estos fragmentos angulosos se encuentran embebidos en una matriz de grava arenosa, con limo, la cual se encuentra parcialmente alterada y poco consolidada. Se observaron fragmentos de roca cuya descripción microscópica indica que es una andesita. El cambio en la coloración y la composición mineralógica de las diferentes unidades de roca nos indica pulsos o eventos eruptivos distintos, que se ve reflejado en las

diferencias en cuanto a alteración mineralógica de la matriz de cada una de ellas. Esta roca tuvo su origen en los flujos de lodo provenientes de un evento eruptivo posterior del volcán Popocatepetl.

d) <u>El aluvión</u>; que conforma el depósito en la zona del cauce, muestra una alta a muy alta compacidad. El depósito aluvial que rellena el cauce del arroyo Amatzinac, está empacado en una matriz de grava con arena limosa, de compacidad alta, con partículas de grava subredondeadas y redondeadas, y arena volcánica cuarzosa, apreciándose algo de mica. Los boleos son rocas andesitas, basaltos, traquiandesitas y riolitas, su diversidad constituye una clara muestra del intenso proceso de erosión y arrastre de materiales provenientes de los aparatos volcánicos de la sierra de Chichinautzin y del volcán Popocatepetl, en donde se origina la Barranca de Amatzinac. Cuesta trabajo desprender los boleos y las gravas, dada la compacidad de la matriz arenosa. Los cortes realizados por la maquinaria en este material presentan ángulos superiores a 60° y en algunas partes más de 80° de inclinación, sin que se aprecie desprendimientos o falla del terrreno.

Las figuras 6, 7, y 8, presentan la planta, sección transversal, longitudinal, geológicas de la boquilla respectivamente.



Figura 6. Ubicación de Boquilla.



Figura 7. Sección Geológica de la Boquilla.



Figura 8. Sección Geológica Longitudinal.

3. EXPLORACIÓN DE LA CIMENTACIÓN.

Para verificar la estratigrafía y permeabilidad del depósito de aluvión en el cauce y bajo la cortina de la presa, se efectuaron en una primera etapa dos sondeos exploratorios con pruebas de permeabilidad y una prueba de geosísmica del tipo Down-Hole que se describe más adelante. Estos sondeos corresponden a los barrenos para inyecciones de la pantalla impermeable de la Línea A denominados AL-6 y AL-9. El primero se llevó hasta una profundidad de 25 m bajo la rasante de la superficie de la losa de concreto de cimentación de la cortina, que se encuentra a la elevación. 1577.50 msnm, mientras que el sondeo AL-9 se perforó hasta 50 m de profundidad.

En una segunda etapa con la finalidad de detectar con la mayor precisión el contacto entre el depósito de aluvión y la roca consolidada de la Fm. Tlayécac, todos los barrenos de la línea A, y en algunos de la línea B, se efectuaron con recuperación de muestras y núcleos de roca. En la figura. 9 se muestra la localización en planta de los barrenos de la pantalla impermeable.



Figura 9. Localización en planta de los barrenos de las líneas A y B de la pantalla impermeable de la P.A. Socavones

Los dos primeros sondeos se perforaron en la línea AL, de aguas arriba, empleando perforación con máquina rotatoria con agua como fluido de perforación y barril doble giratorio NXL de 150 cm de longitud y broca de diamante de diámetro NQ, empleando ademe metálico recuperable de diámetro NW para estabilizar la perforación en la zona del aluvión. En la fig.14 se muestra la posición de los sondeos efectuados, como se anotó antes, todos los barrenos de la línea A y varios de la línea B terminaron convirtiéndose en sondeos exploratorios debido a la necesidad de tener bien localizado el contacto entre el aluvión y la roca de la Fm. Tlayécac para fines de la ejecución de la pantalla de inyecciones.





Figura 10. Posición de los sondeos exploratorios de estudios especiales complementarios (AL-6) y (AL-9), así como de los barrenos de inyección de la pantalla impermeable.

Todos los sondeos efectuados con recuperación de núcleos de roca, se perforaron hasta una profundidad tal que se tuviera la certeza de haber penetrado por lo menos de 5 a 10 m en la roca bajo el aluvión, o bien, hasta la profundidad máxima de exploración de 50 m que correspondió al sondeo AL-9, que aunque el contacto con la Fm. Tlayécac apareció a una profundidad de 11.5 m de profundidad, en forma de una brecha soldada en una matriz vítrea, el sondeo se profundizó para asegurar la continuidad de la Fm. Tlayécac, explorando hasta más de 2.5 veces la altura total de la cortina. En estos sondeos se realizaron pruebas de permeabilidad de tipo Lefranc de tipo Carga Constante¹⁰, conforme avanzaba la perforación y en tramos de 1.0 a 1.5 m de longitud en la parte del aluvión, y de 5.0 m. en la Fm. Tlayécac.

En las siguientes páginas se muestran fotografías de algunas de las muestras obtenidas de los sondeos (AL-6) y (AL-9). Los núcleos de boleo o brecha volcánica en muy contadas ocasiones se lograron recuperar con la matriz que constituye el material de empaque de la Fm. Tlayécac. Esto se explica por la acción de desintegración que sobre la roca poco o parcialmente consolidada de la Fm. Tlayécac ejercen tanto el fluido de perforación como la acción mecánica de la herramienta (barril NXL y broca NQ). Sin embargo, en todos los barrenos o sondeos, se detectó la brecha soldada con matriz vítrea, que en general señaló el contacto entre el aluvión y la Fm. Tlayécac.

¹⁰ Manual de Mecánica de Suelos de la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, edición 1970 complementado por el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.

AL-6 CAJAN 1 1

Fotografía 1. Sondeo (AL-6): el bolígrafo está sobre un núcleo de brecha soldada humedecido. Se aprecia cómo continúan núcleos de la misma brecha soldada, y sobreyacen a un núcleo de la Fm. Tlayécac con mismo material que aflora en las laderas.



Fotografía 2. Sondeo AL-9: el bolígrafo está sobre un núcleo de brecha soldada humedecido. Se aprecia cómo continúan núcleos de la misma brecha soldada, y como en el AL-6, continúan núcleos de la Fm. Tlayécac del mismo material que aflora en las laderas.

3.1 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.

En el caso del Sondeo AL-6, perforado a 25 m de profundidad y localizado al centro del cauce y ligeramente hacia la margen izquierda, se realizaron 12 pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 1.50 m de longitud hasta una profundidad de 13.50 m y de 5.0 m de longitud a partir de los 13.5 m hasta 25.0 m correspondiente al fondo del sondeo. Con estas pruebas se tuvo muy buena información de la permeabilidad del depósito de aluvión.

La profundidad del contacto aluvión-Formación Tlayécac, en este sondeo se ubicó aproximadamente a 10.5 m, de acuerdo con las observaciones realizadas en las muestras recuperadas. Los valores de permeabilidad obtenidos en el sondeo AL-6 se muestran en el cuadro 1.

Pruebas de Permeabilidad Sondeo AL-6								
Profu	ndidad							
(r	n)	Prueba						
de:	a:	Lefranc	k (cm/s)					
1.5	3	CV	7.75E-04	aluvión				
3	4.5	CV	1.26E-03	aluvión				
6	7.5	CC	1.14E-03	aluvión				
7.5	9	CC	4.74E-03	aluvión				
9	10.5	CC	6.29E-03	aluvión				
				contacto				
9	10.5	CV	4.78E-03	Fm. Tlayécac				
10.5	12	CC	4.79E-03	Fm. Tlayécac				
10.5	12	CV	3.04E-03	Fm. Tlayécac				
10.5	13.5	CC	1.68E-03	Fm. Tlayécac				
13.5	18.5	CC	6.20E-04	Fm. Tlayécac				
18.5	23.5	CC	4.49E-04	Fm. Tlayécac				
23.5	25	CC	6.06E-04	Fm. Tlayécac				

CV: Prueba con Carga Variable

CC: Prueba con Carga Constante

Cuadro 1. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad en el Sondeo AL-6, con pruebas Lefranc

Como se observa en los resultados, el incremento de impermeabilidad se presenta aproximadamente abajo del contacto aluvión - formación. En cuanto a las pruebas de permeabilidad efectuadas en el Sondeo (AL-9), que se perforó hasta 47.90 m de profundidad y se localizó al centro del cauce, ligeramente hacia la margen derecha. Los valores de permeabilidad son similares.

Cabe destacar que se realizó una prueba de permeabilidad "global" en el sondeo, en el tramo de 12.0 a 25.0 m de profundidad donde ya se tenía a la Formación Tlayécac, con la finalidad de medir su permeabilidad promedio. La prueba se efectuó en tres ocasiones distintas, para medir y asegurar la reproducibilidad del valor del coeficiente de permeabilidad, obteniéndose el valor promedio de 1×10^{-5} cm/s considerándose como impermeable.

Prueba de Permeabilidad Tipo Lefranc.

La prueba de permeabilidad consiste en inyectar o extraer el agua de una perforación con una carga hidráulica relativamente pequeña, equivalente a la gravedad, determinada por la posición del brocal de la perforación, aunque existe la posibilidad de aprovechar el equipo Lefranc para modificar las condiciones y usar una carga hidráulica más importante, con ayuda de un inyector con obturadores se podría realizar una especie de prueba Lugeon, con presiones relativamente bajas, en función de la posición del tanque de suministro de agua con respecto a la parte media del tramo de prueba.

La prueba Lefranc modificada por Mandel y finalmente conocida también como prueba Lefranc – Mandel es especialmente indicada para medición de permeabilidad o conductividad hidráulica en depósitos de aluvión cuando existe un manto freático que satura el material a fin de contar con la hipótesis de saturación del depósito a ensayar, como es el caso en el sitio de la P. A: Socavones.

La prueba consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno, de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, con una carga pequeña

constante de agua. La medida del gasto de la carga que lo origina permite calcular el coeficiente de permeabilidad *K*, en la vecindad de la cavidad con una buena aproximación.

En tanto que la permeabilidad del aluvión sea mayor que, digamos, $1x10^{-4}$ cm/s ($1x10^{-6}$ m/s), como es el caso del cauce del Amatzinac, se utiliza la prueba Lefranc de carga constante por inyección de agua.

En caso de que la permeabilidad fuese menor que ese valor, como es el caso de la roca tobácea de la formación Tlayécac, la prueba Lefranc de carga variable, por inyección o extracción, sería preferible.

Se realizaron por cada tramo de prueba Lefranc en el sitio del cauce de la P.A. Socavones seis ensayos con seis gastos diferentes, cuatro con gastos ascendentes, y dos más con gasto descendente, de manera que al final de se obtuvo una gráfica de gastos q_i contra carga hidráulica h_i, que permitió determinar la permeabilidad del tramo de prueba.

Equipo:

- Tanque para suministro, con alimentación para mantener constante el nivel del agua en el tanque, de manera a establecer un gasto constante de agua. Equipado con tubería y bypass "Y" para medir el gasto mediante un dispositivo de tanque auxiliar con escalas para medición de gasto, y con posibilidad de utilizar probeta graduada para calibración de abertura de válvulas y medición del gasto. El tamaño del recipiente se debió calcular de acuerdo con el gasto que podría llegarse a suministrar durante cada prueba, suponiendo un valor de la permeabilidad y otros parámetros en las fórmulas correspondientes.

- Bomba para abastecer con agua el tanque para suministro, y mantener constante el nivel del agua en éste.

- Tubería de conducción tanque – barreno, con sus válvulas en bifurcaciones "Y".

29

- Sonda eléctrica de precisión para medición del nivel del agua en el sondeo.
- Ademe metálico NW, o similar en el sondeo.
- Cono con válvula de tres vías.



Procedimiento Lefranc (Lefranc – Mendel) Carga Constante:

- Se colocó el ademe metálico a una distancia "L" del fondo de la perforación de diámetro "D" o bien, el sistema de inyección con obturadores en el tubo de manguitos para verificación de efectividad y eficiencia de la inyección del aluvión en el subsuelo del cauce de la P.A. Socavones. El tramo de medición "L" será nula
si se desea medir la permeabilidad vertical, o idealmente de 40 cm si se desea la permeabilidad horizontal, aunque podría ser mayor, sin superar los 500 cm para tener permeabilidad "promedio" del aluvión. En el caso del sitio de Socavones, parece conveniente que el tramo sea de L= 50 a 100 cm, en concordancia con la longitud de la longitud del tubo de manguitos para la inyección de construcción de la pantalla impermeable.

- Se establece previo a iniciar la prueba la profundidad del nivel de agua freática NAF, con respecto al brocal del ademe metálico, que servirá como el punto de referencia de todas las mediciones de longitudes o profundidades. A esta magnitud de profundidad del NAF se denominará como H₀, en metros.
- Se colocó dentro del barreno la tubería que viene desde el tanque de suministro, cuidando que quede bien por debajo del NAF para evitar turbulencia.
- Se realizó la medición del nivel del agua dentro del barreno, utilizando la sonda eléctrica, anotando la i-esima lectura de la profundidad del agua dentro del barreno desde el brocal del ademe como H_i, en metros. Esto se hace de la forma siguiente:

1.- Se hace una primera lectura de la profundidad del agua en el barreno, H_i, en metros, simultáneamente con el tiempo t_i.

2.- Se repite cada 10 min. (diez minutos) se realiza una nueva lectura de la profundidad del agua en el barreno, H_i, en metros, simultáneamente con el tiempo t_i. Cuando entre dos lecturas espaciadas 10 min. no se observen cambios del nivel del agua H_i, es decir, que el nivel del agua dentro del barreno se encuentra estabilizado, en ese momento se esperan otros 10 min, para asegurarse de la

estabilización del flujo del agua en el barreno y se procede a medir el gasto correspondiente.

3.- Para medir el gasto q_i inyectado, estabilizado el nivel H_i en el barreno, se utiliza el bypass "Y" de la tubería del tanque de suministro, para hacer pasar el agua al recipiente de medición de gasto de volumen "V" conocido, midiendo el tiempo t_Q que tarda en llenarse dicho recipiente para conocer el gasto como q_i = V/ t_Q.

 Se inició una nueva prueba modificando el gasto q_i lo cual se logra abriendo o cerrando la válvula de alimentación de la tubería desde el tanque de suministro. La prueba de realiza de la misma manera que como se indico antes.

- Se realizaron por cada tramo de prueba Lefranc en el sitio de cauce de la P.A. Socavones seis ensayos con seis gastos diferente, cuatro con gasto ascendente y dos más con gasto descendente, de manera que al final se obtuvó una gráfica de gastos q_i contra carga hidráulica h_i, que permite determinar la permeabilidad del tramo de prueba.

Interpretación:

 Dibujar gastos q_i en litros por segundo l/s contra carga hidráulica h_i, en metros m, y se emplean las siguientes fórmulas:

Gasto ensayo "i":	$\mathbf{q}_i = \mathbf{V} \ / \ \mathbf{t}_Q$
Carga hidráulica ensayo "/":	$\mathbf{h}_i = \mathbf{H}_o - \mathbf{H}_i$
Permeabilidad ensayo "i":	$k = \frac{q_i}{(h_i C)} = \frac{m}{C}$

hi

Ha

 $\mathbf{q}_{\mathbf{i}}$

V

tq

С

k

m



en donde:

carga hidráulica h para el gasto qi, en m.

- posición inicial del NAF, en m.
- H_i posición estabilizada del agua para q_i, en m.
 - gasto de la prueba "i", en m³/s
 - volumen del recipiente de medición, en m3
 - tiempo de llenado del recipiente de
 - medición, en segundos (s)
 - coeficiente de forma, en m (cuadro 1) coeficiente de permeabilidad, en m/s
 - coefficience de permeaonidad, en mis
 - pendiente de la recta en una gráfica \mathbf{h}_i - \mathbf{q}_i

Relación <i>L / D</i>	Cavidad / Permeabilidad Local	Coeficiente C	
0	Disco / Vertical	C = 2.75 D (estrato uniforme) C = 2.00 D (estrato impermeable sobre estrato permeable)	
$0 \le \frac{L}{D} \le 1$	Esfera / Promedio	$C = 2\pi D \sqrt{\frac{L}{D} + 0.25}$	
$1 \le \frac{L}{D} \le 4$	Elipsoide / Horizontal	$C = \frac{2\pi L}{Log_{e}\left[\frac{L}{D} + \sqrt{\frac{L^{2}}{D^{2}} + 1}\right]}$	

Prueba Lefranc de carga variable.

En el caso de la prueba Lefranc de carga variable, se realiza la lectura del nivel H_0 del NAF estabilizado antes de iniciar la prueba. Luego, el barreno se llena de agua hasta el brocal y se realizan lecturas de la variación del nivel del agua H_i dentro del barreno con el tiempo t_i . En donde h_2 y h_1 son los niveles entre los tiempos t_2 y t_1 , de manera que se calculan varios pares de valores contiguos, i.e. (h_2 , t_2) con (h_3 , t_3); luego (h_3 , t_3) con (h_4 , t_4); etc., y al final se calcula la permeabilidad o conductividad hidráulica, *k*, como el promedio de los pares de lecturas contiguas. Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

Carga hidráulica ensayo "i" de inyección: $h_i = H_0 - H_i$

Carga hidráulica ensayo "i" de extracción o bombeo: $h_i = H_i - H_0$

Permeabilidad ensayo "i":
$$k = \frac{\pi D^2}{4C(t_2 - t_1)} Log_e\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

4. PROPIEDADES DE LAS UNIDADES LITOLOGICAS.

Para la determinación in situ las propiedades elasto-dinámicas y verificación de la geometría del depósito de aluvión en el cauce y de la Formación Tlayécac en el cauce y las laderas, se realizó un Estudio Geofísico constituido de seis Tendidos de Sísmica de Refracción (TSR), un sondeo con técnica de Sísmica "Down-Hole" (TSDH), y dos sondeos eléctricos verticales (SEV), para corroboración y apoyo a la interpretación geofísica. En la figura 15 se muestra la localización de los estudios.

De los seis tendidos de sísmica de refracción (TSR), cuatro permitieron determinar las propiedades de deformabilidad del aluvión y las rocas de la Fm. Tlayécac, es decir, determinar el módulo de Young (E)¹¹ y el de corte (G), correspondientes a módulos tangentes de la rama inicial de la relación esfuerzo – deformación de los suelos, así como verificar los contactos entre los geomateriales aluviales con la roca (compacta, no consolidada, no cementada) de la Formación Tlayécac; mientras que los otros dos TSR permitieron conocer con mayor precisión las velocidades de onda de la roca de la Fm. Tlayécac e identificar la profundidad de la zona mas descomprimida en cada una de las márgenes. Tres tendidos fueron transversales según la dirección del río y se efectuaron de manera que no hubiera influencia de la cortina, una parte estaba ya construida pero a la vez que estuviesen lo suficientemente cerca para ser representativos de la zona de la zona de la pantalla impermeable.

En adición, se ejecutó en el barreno AL-6, un estudio geosísmico con la Técnica de Sísmica de "Down-Hole" (TSDH), de 21 m de profundidad, atravesando el depósito superficial de aluvión y penetrando en la roca parcialmente consolidada de la Fm. Tlayécac. Mediante el TSDH se realizaron mediciones de onda P

¹¹ Teoría de la Elasticidad. Leyes de refracción fundamentadas por Fermat y Huygens.

(longitudinal o compresional) y de onda S (cortante), utilizando un geófono de tres componentes que se introdujo en el barreno haciendo lecturas a cada metro desde la superficie hasta alcanzar el fondo del barreno. A partir de las mediciones efectuadas, se evaluaron los parámetros elasto-dinámicos (relación de Poisson, módulo de cortante y módulo de Young o Elástico).

4.1 ESTUDIOS GEOFÍSICOS.

La exploración con los métodos de sísmica de refracción y sondeos eléctricos verticales que requirieron el tendido de líneas de 44 m a 90 m de longitud sobre la superficie del terreno se vio limitada por las excavaciones y el avance de la construcción de la cortina de mampostería que impidió realizar la exploración en la zona misma del desplante, recurriendo a efectuar esta exploración en las zonas adyacentes a la cortina y a las excavaciones.



Figura 15. Localización de los TRS, Down-Hole y SEV del estudio de Geofísica

Como fuente de energía, tanto en los 6 TSR como en el TSDH, se utilizó el golpe de un marro de 12 libras de masa sobre una placa metálica y la señal emitida por el impacto fue registrada por un sismógrafo de 12 canales acoplado al dispositivo mencionado.

En el caso del TSDH ("Down-Hole") del barreno AL-6 una vez terminado el muestreo, se equipó con un tubo de PVC de .06 m de diámetro interior, en tramos acoplados con uniones roscadas y con un tapón al fondo. El espacio anular entre la pared del barreno y la pared exterior del tubo de PVC se rellenó con una vaina formada por una mezcla fraguante de agua-bentonita-cemento y el tubo de PVC fue llenado con agua, reteniendo ésta sin pérdidas. En el barreno se introdujo el geófono triaxial que recibía la señal de arribo de las ondas longitudinales y transversales, las cuales se generaron en un punto de tiro ubicado en la superficie del terreno y distante de 1.5 m del brocal del barreno, se realizaron 21 lecturas de velocidad de propagación de onda longitudinal y transversal en intervalos a cada metro de profundidad dentro del barreno exploratorio (AL-6) con el método de Down-Hole (lecturas de la superficie hacia el fondo del barreno) ubicado en el eje de la cortina

En los siguientes párrafos, se describen los trabajos de exploración geofísica efectuados en el sitio, así como los resultados obtenidos. En las siguientes fotografías se muestran las actividades efectuadas durante la medición de los parámetros con los métodos geofísicos.

37





Fotografía 3. Medición de propiedades de deformación y verificación de estratigrafía con métodos de exploración geofísica: TRS, Down-Hole y SEV, en la P.A. Socavones

Exploración geofísica con 6 TRS y 2 SEV



Fotografía 4. Medición de propiedades mecánicas y verificación de estratigrafía con métodos de exploración geofísica: TRS, Down-Hole y SEV, en la P.A. Socavones



Exploración geofísica con 6 TRS y 2 SEV

Fotografía 5. Medición de propiedades mecánicas y verificación de estratigrafía con métodos de exploración geofísica: TRS, Down-Hole y SEV, en la P.A. Socavones

El Método del Down-Hole permitió realizar mediciones de los tiempos de propagación de las ondas longitudinal y de cortante a cada metro de profundidad del subsuelo, tanto en los materiales aluviales como en los materiales brechoides.



Fotografia 6. Posición del Sondeo (AL-6) en donde se realizó el Down-hole

El trabajo de campo se efectuó colocando una sonda constituida por un geófono triaxial en el interior del tubo de PVC de .06 m con el que se equipó el barreno SM-AL-6, ubicado hacia la porción central del sitio de la cortina, desplazándola a cada metro de profundidad hasta alcanzar la profundidad máxima de 21 m. Por cada posición de la sonda colocada en el interior del barreno, se generaron impulsos

sísmicos en la superficie del terreno mediante el golpe de un marro sobre una placa metálica colocada sobre el terreno a la distancia de 1.75 m del centro del brocal del barreno para la generación de las ondas longitudinal y transversal; en ambos casos, tanto la placa como el marro fueron sincronizados con el sismógrafo que registró los diferentes tiempos de arribo de las ondas longitudinales y transversales.

En gabinete se efectuaron las lecturas de los tiempos de arribo de las ondas longitudinales y transversales a partir de las señales registradas en el sismógrafo y grabadas en una computadora portátil. Los tiempos de arribo fueron corregidos en su componente vertical para cada intervalo de medición y con esta información se generó la curva dromos (gráfica tiempo-profundidad) que permitió obtener las velocidades sísmicas a las diferentes profundidades. Con las velocidades obtenidas y utilizando los valores de densidad de los materiales atravesados por el barreno, se calcularon los parámetros elástico-dinámicos cuyos valores a continuación se describen.

En el Cuadro 2, se presentan los valores de velocidad evaluados para el sitio donde se efectuó el estudio de Down-Hole correspondiente con el Sondeo (AL-6) para los diferentes intervalos de profundidad, así como los parámetros sismoelásticos correspondientes obtenidos a partir de las velocidades y de la densidad o peso volumétrico natural estimado de cada uno de los estratos muestreados del subsuelo. En la figura 16 se muestra en una escala apropiada la variación gráfica correspondiente a cada uno de los parámetros elástico-dinámicos que fueron obtenidos a lo largo del barreno.

41



Exploración geofísica con técnica de prospección Sísmica de Down-hole de 1577 a 1552 msnm

Figura 16. Propiedades mecánicas del subsuelo bajo la cortina P.A. Socavones

El Down-Hole alcanzó una profundidad de prospección de 21 m y se aprecia una alternancia en los valores de las velocidades de onda con la profundidad a todo lo largo del sondeo. Los resultados de los parámetros elástico-dinámicos se obtuvieron a partir de los valores de densidad estimados para los diferentes paquetes de materiales definidos en el subsuelo, los cuales fueron de 2.0 g/cm³ para el material aluvial detectado hasta 14 m de profundidad y de 2.2 g/cm³ para la roca brechoide detectada entre 14 y 21 m de profundidad, tal como se muestra en los valores de el cuadro 2. En forma particular se lograron observar tres diferentes comportamientos geosísmicos a diferentes intervalos de profundidad asociados con las velocidades obtenidas a lo largo de todo el barreno.

PROFUNDIDAD	VELOC SISM	IDADES ICAS	DENSIDAD	MODULO DE	MODULO DE	MODULO DE
				POISSON	CORTE	YOUNG
	Vp	Vs	γ	μ	G	Ε
	(m/s)	(m/s)	(g/cm ³)		(t/cm ²)	(t/cm ²)
1	1680	630	2.00	0.4182	8.0882	22.9412
2	1643	444	2.00	0.4605	4.0254	11.7583
3	1910	420	2.00	0.4746	3.5960	10.6053
4	1528	403	2.00	0.4627	3.3034	9.6638
5	984	368	2.00	0.4188	2.7613	7.8353
6	861	336	2.00	0.4103	2.2968	6.4783
7	982	388	2.00	0.4075	3.0688	8.6387
8	984	483	2.00	0.3418	4.7485	12.7434
9	1302	435	2.00	0.4373	3.8520	11.0728
10	989	489	2.00	0.3383	4.8781	13.0566
11	991	438	2.00	0.3785	3.9129	10.7878
12	1315	493	2.00	0.4183	4.9481	14.0358
13	1318	494	2.00	0.4183	4.9723	14.1041
14	1320	656	2.00	0.3362	8.7672	23.4285
15	1968	657	2.20	0.4372	9.6947	27.8656
16	1973	788	2.20	0.4051	13.9202	39.1185
17	1977	983	2.20	0.3359	21.6508	57.8459
18	1980	791	2.20	0.4050	14.0363	39.4413
19	1982	792	2.20	0.4049	14.0771	39.5551
20	1984	793	2.20	0.4049	14.1108	39.6491
21	1986	663	2.20	0.4373	9.8545	28.3283

1 t/cm2 = 1,000 kg/cm2 = 100,000 kN/m2 = 100 N/mm2 = 100 MPa = 100 MN/m2 (asumiendo que la aceleración de la gravedad fuese de 10 m/s2)

El primer comportamiento se observa en los materiales localizados desde la parte superficial y aproximadamente hasta los 4 m de profundidad, donde los valores de velocidad obtenidos presentan un intervalo de 1528 a 1910 m/s para la onda longitudinal y de 403 a 630 m/s para la de corte, estos valores corresponden con el paquete de material aluvial superficial y posiblemente fueron influenciados por la losa de concreto que cubre esta zona. Para este intervalo se consideraron en el cálculo de los parámetros elástico dinámicos un valor de densidad de 19.62 kN/m³ (2 g/cm³), obteniendo valores para el módulo de Young E = 966 a 2294 Mpa (MN/m²), mientras que para el módulo de Corte se obtuvieron valores de G = 330 a 809 Mpa, para una relación de Poisson de 0.42 a 0.47.

Un segundo comportamiento se observa en el intervalo de 5 a 14 m de profundidad, con una disminución en los valores de velocidad obtenidos tanto para la velocidad de onda longitudinal (Vp) como para la velocidad de onda de corte (Vs) que varían de 861 a 1320 m/s y de 336 a 656 m/s, respectivamente, observando en forma general una zona de menores valores entre los 5 y 11 m de profundidad. Los materiales perforados en toda esta zona corresponden con el paquete de materiales aluviales. Para este tramo el intervalo de valores obtenidos para los módulos, considerando el mismo valor de densidad de 19.62 kN/m³ (2g/cm³) fueron de E = 648 a 2343 MPa (MN/m²) para el módulo de Young, mientras que para el módulo de Corte fueron de G = 230 a 877 MPa y con una relación de Poisson de 0.34 a 0.44.

El tercer comportamiento geosísmico corresponde con el tramo ubicado entre los 15 y 21 m de profundidad, en el cual se obtuvieron los valores de velocidad mas altos en todo el terreno, dichos valores varían de 1968 a 1986 m/s para la onda longitudinal y de 657 a 983 m/s para la de corte; Estas velocidades se asocian posiblemente con la presencia de la roca de la Fm. Tlayécac, a la cual se le asignó un valor de densidad de 21.58 kN/m³ (2.2g/cm³) mediante el que se obtuvo un intervalo de valores para el Módulo de Young (E) de 2787 a 5785 MPa, para el Módulo de Corte (G) de 970 a 2165 MPa y una relación de Poisson de 0.34 a 0.44.

En la segunda etapa del estudio se efectuaron seis tendidos sísmicos de refracción para conocer las características de compacidad de los diferentes

materiales del subsuelo, sobre el que se desplantó la cortina, detectar los espesores de los mismos y tratar de definir el contacto entre los materiales aluviales y la roca de la Fm. Tlayécac.

Las longitudes de los tendidos fueron de 44 m para el tendido 1, 85 m para el tendido 3 y 65 m para los tendidos 2, 4, 5 y 6; estas longitudes y la posición de los puntos de tiro permitieron explorar en forma indirecta el subsuelo hasta una profundidad mínima de 15 m bajo el tendido 1 y máxima de 30 m en el caso del tendido 3; en los tendidos restantes la profundidad de prospección vario entre 20 y 25 m.

Debido a las excavaciones y a la construcción existente de la cortina de mampostería, fue necesario ubicar los tendidos sísmicos de tal forma que tuvieran continuidad en zonas donde no hubiese desniveles importantes; así entonces, los tendidos 1 con rumbo NE 46° SW, 2 (NW 12° SE) y 3 (NW 17° SE) se ubicaron sobre el cauce en la porción aguas abajo de la cortina, el tendido 4 se realizó también en el cauce del arroyo (canal de desfogue) en la porción aguas arriba con dirección NW 40° SE y los tendidos 5 y 6 (paralelos al cauce del arroyo) se efectuaron fuera de la zona del cauce en las márgenes del arroyo, a lo largo de los caminos de acceso que van a los empotramientos de la cortina.



Fotografía 7. Posición de los tendidos TRS aguas abajo y laderas P.A. Socavones

En los diferentes tendidos sísmicos se colocó una sarta de 12 geófonos de onda P hincados en el terreno con separaciones constantes entre geófonos, utilizando de tres a seis puntos de tiro; en el caso del tendido 1 que fue el mas corto y en los tendidos realizados en las márgenes del arroyo sobre los hombros de los taludes se utilizaron 3 puntos de tiro, en los tendidos 2 y 4 cuatro puntos de tiro y solo en el tendido tres que fue el mas largo se utilizaron seis puntos de tiro. En el caso de los tendidos y uno en la parte central del mismo, mientras que para los de cuatro puntos de tiro se ubicaron en los extremos del tendido 3 con seis puntos de tiro se ubicaron cuatro de ellos hacia los extremos de los geófonos 1 y 12 quedando el PT1 y el PT6 a 15m de separación y el PT2 y PT5 a 5 m de separación, y los dos puntos de tiro restantes (PT3 y PT4) se ubicaron entre los geófonos 4-5 y 8-9.

Para la generación del tren de ondas sísmicas en el terreno, se utilizó una placa metálica colocada en cada punto de tiro, la cual se golpeo repetidamente con un marro de 12 libras (5.44 Kg) de peso, sincronizando cada golpe con el sismógrafo mediante la conexión del marro con la placa y los geófonos



Fotografía 8. Punto de tiro PT3 del tendido 6 realizado en el camino de acceso al empotramiento de la cortina de la margen izquierda

En las figuras. 17, 18 y 19 se muestran las dromocromas de cada tendido TRS, correspondientes a los perfiles geosísmicos obtenidos de cada tendido, con los valores de tiempo y distancia de arribos de las ondas longitudinales o compresionales.



Dromo del TRS 1 P.A. Socavones



Dromo del TRS 2 P.A. Socavones

Figura. 17



Dromo del TRS 3 P.A. Socavones



Figura. 18



Dromo del TRS 5 P.A. Socavones



Dromo del TRS 6 P.A. Socavones

Figura. 19

4.2 UNIDADES LITOLÓGICAS.

El procesamiento, análisis e interpretación de los valores de velocidad obtenidos durante los trabajos de prospección sísmica realizados con los diferentes tendidos en campo, cuyos valores de velocidad de onda longitudinal se asociaron con las diferentes características de compacidad de los materiales del subsuelo, logrando diferenciar en forma general dos unidades geosísmicas; aunque en el tendido 6 fue posible diferenciar hasta tres unidades. Los resultados se resumen en el cuadro 3 y en los siguientes párrafos se describe la distribución de cada una de las unidades en cada tendido realizado.

UNIDAD GEOSISMICA	VELOCIDAD (Vp) (m/s)	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
U1	260 - 480	0.5 - 3.8	Material aluvial suelto o suelo y/o roca muy descomprimida
U2	1050 - 1150	2.0 - 4.6	Roca medianamente compacta
U3	1900 - 2200	Mayor de 20	Material aluvial compacto y/o roca brechoide compacta

Cuadro 3. Descripción geomecánica de las Unidades Geosísmicas inferidas de los TRS.

Unidad Geosísmica U1:

La unidad geosísmica U1 corresponde en todos los tendidos con el paquete de materiales más superficiales alterados o sueltos. Esta unidad presenta un intervalo de bajos valores de velocidad de onda longitudinal que varía de 260 a 480 m/s y la distribución y los materiales asociados con esta unidad varían en función de la zona donde se ubicaron, esto es, en el caso de los tendidos 1, 2 y 3 realizados en la zona del cauce aguas abajo de la cortina, la unidad U1 muestra una velocidad promedio de 350 m/s que se asocia con la presencia de material aluvial suelto, el cual es posible observar en el corte realizado para el desplante de la cortina, el mínimo espesor de este material observado en la zona fue de 1.5 m aproximadamente y se obtuvo en el tendido 3 (realizado en forma transversal al eje de la cortina), específicamente en los sitios donde se ubicaron los puntos de tiro PT2 y PT3; fuera de estos puntos, el espesor se mantiene entre 2 y 3 m. En el tendido 4 realizado en una de las orillas del canal de desfogue (aguas arriba de la cortina) se observa mayor variación de las velocidades de esta unidad aún cuando el material asociado es el mismo que en los tendidos anteriores, con un espesor a lo largo del tendido que varía de 1 a 1.5 m, aproximadamente. En los tendidos 5 y 6 realizados en los caminos de acceso a los empotramientos de la cortina en las márgenes derecha e izquierda se presentaron los mayores valores de velocidad de esta unidad y en ambos casos el material asociado con dichos valores es suelo residual o roca de la Fm. Tlayécac muy descomprimida. El espesor en el caso del tendido 5 muestra un delgado estrato de apenas 1 m entre el punto de tiro PT1 y PT2, el cual tiende a aumentar tal como se observa en el perfil geosísmico correspondiente; En el tendido 6, el mayor espesor se obtuvo hacia la zona donde se ubicó el punto de tiro PT1 y tiende a disminuir hacia la zona del punto de tiro PT3.

Unidad Geosísmica U2:

La unidad geosísmica U2 sólo fue posible definirla a lo largo del tendido 6, realizado en el camino de acceso al empotramiento de la cortina en la margen izquierda, el cual muestra un valor promedio de velocidad de onda longitudinal de 1100 m/s, asociado posiblemente con un paquete de cenizas volcánicas o con una roca brechoide alterada y medianamente compacta. El espesor a lo largo del tendido varia de 2 a 5 m tal como se muestra en la figura del perfil geosísmico correspondiente, donde al inicio del tendido y por debajo del punto de tiro PT1 alcanza los 2 m de espesor, mientras que hacia la parte final del tendido (PT3) aumenta dicha profundidad.

Unidad Geosísmica U3:

La unidad geosísmica U3 definida como la más profunda de acuerdo con la longitud de los tendidos realizados, muestra un aumento en los valores de velocidad de onda longitudinal (Vp) los cuales varían de 1900 a 2200 m/s; este intervalo de valores se asocia posiblemente con la presencia del mismo paquete de materiales aluviales solo que mucho más compacto o con la presencia de la roca brechoide, dado que no fue posible encontrar una diferencia notable de comportamiento geosísmico que pudiera delimitar el contacto entre ambos materiales, se considera de acuerdo con la profundidad prospectada que la respuesta sísmica pudiera evidenciar la presencia de la roca a profundidad. Es necesario aclarar que el espesor de esta unidad se limita a la profundidad prospectada ya que su espesor real no se definió al no encontrar un contacto más profundo, por lo que el espesor es mayor a los 20 m.

53

En adición a los métodos geosísmicos descritos anteriormente, y con la finalidad de complementar a los mismos para definir cambios en la composición de los materiales del subsuelo y el posible contacto entre el material aluvial y la roca, se utilizó el método del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), que entre sus variedades tiene el arreglo electródico Wenner o método de los cuatro puntos, para identificar la estratigrafía en función del parámetro de resistividad del medio.

Para obtener la resistividad del terreno se efectuaron dos sondeos, el primero (SEV-1) para obtener las resistividades del aluvión y la roca Fm. Tlayécac en el sitio donde se realizó el tendido 3 de refracción sobre el cauce del río y hacia la margen izquierda, aguas arriba de la cortina, colocando la línea de electrodos con la misma dirección del tendido y ubicando el punto de atribución del SEV a 45 m del eje de la cortina; el segundo se efectuó en el sitio donde se realizó el tendido 5 de refracción tendiendo las líneas de electrodos en la misma dirección del tendido para obtener solo los valores resistivos de la roca de la Fm. Tlayécac y comparar con los del SEV-1.

Las aberturas para los electrodos en el SEV-1 fueron de a = 1, 1.6, 3, 5, 7, 10, 14, 20, 25 y 30m, por lo que la distancia máxima entre electrodos de corriente (AB) fue de 90 m, permitiendo este arreglo alcanzar una profundidad real de prospección de 30 m; en el caso del SEV-2, la distancia máxima entre los electrodos de corriente (AB) fue de 60 m alcanzando una profundidad de prospección de 20 m; en ambos casos esta profundidad es función de la distribución y características de los materiales en el subsuelo y es mayor o muy cercana a la profundidad de investigación deseada.

En las figura 20 se muestran los perfiles geoeléctricos obtenidos de cada SEV, con los valores de resistividad real y los contactos geoeléctricos de cada una de las diferentes capas definidas con este método. Los resultados de las mediciones de resistividad se procesaron e interpretaron asociándose con el diferente

comportamiento geoeléctrico existente en el subsuelo.



Perfil geoeléctrico obtenido en el SEV 1



Perfil geoeléctrico obtenido en el SEV 1

Figura 20.

El procesamiento de la información obtenida en campo de cada uno de los 2 SEVs realizados, permitió asociar los valores resistivos con los diferentes materiales existentes en el subsuelo hasta 30 m de profundidad que fue la máxima profundidad alcanzada con la abertura electródica empleada (AB=90m). El punto de atribución del SEV 1 se ubicó a 45 m aguas abajo de la zona de la cortina lo que permitió tener una mayor abertura electródica y mayor profundidad de prospección, la línea de electrodos se abrió en la misma dirección en la que se realizó el tendido sísmico 3; el punto de atribución del SEV-2 se ubicó en el hombro del talud de la margen derecha (tendido 5) con una abertura electródica de AB=60 m para alcanzar una profundidad de prospección de 20 m.

SEV-1:

Los resultados obtenidos del SEV-1 muestran la existencia de tres unidades geoeléctricas mientras que en el SEV-2 solo se definieron dos unidades, en ambos casos se presentan con diferentes intervalos de resistividad de acuerdo con el comportamiento y análisis de la interpretación de las curvas de campo. Los perfiles geoeléctricos correspondientes de cada sondeo se muestran en la figura. 21. En el SEV-1 el primer comportamiento geoeléctrico corresponde con la parte más superficial, la cual presenta un muy alto valor de resistividad (1385 ohm-m) asociado con el material aluvial de cobertura granular de depósito reciente en estado suelto y seco existente en esta zona, esta capa muestra un espesor delgado de apenas 1 m aproximadamente, subyaciendo a este estrato se observa en el perfil geoeléctrico correspondiente un segundo comportamiento geoeléctrico con características resistivas diferentes, esto es, el valor de resistividad disminuye considerablemente a 256 ohm-m, por lo que se asocia posiblemente con la presencia del paquete de materiales aluviales, el espesor de este paquete es de aproximadamente 14 m en el sitio donde se ubicó el punto de atribución del SEV

(ubicado sobre el cauce a 45m del eje de la cortina). De acuerdo con la abertura electródica utilizada fue posible definir un tercer comportamiento resistivo con un cambio notable en las características resistivas, en el cual se obtuvo un valor de resistividad de 33 ohm-m asociado posiblemente con la presencia de la roca brechoide, el espesor real de este paquete de materiales no pudo ser definido dado que no se encontró otro contacto con diferentes materiales a mayor profundidad, pero en función de la longitud del SEV este paquete presenta mas de 15 m de espesor.

SEV-2:

Este segundo sondeo eléctrico se efectuó aguas abajo, en el camino de acceso al empotramiento de la cortina en la margen derecha para definir las características resistivas de la roca, por lo que no fue necesario alcanzar una profundidad de prospección tan grande como la del SEV anterior. De acuerdo con los resultados obtenidos en este sitio, se lograron definir dos comportamientos resistivos muy similares entre si que posiblemente se asocian con las características resistivas obtenidas con el paquete de materiales más profundo definido en el SEV-1 asociado con la roca brechoide. En el perfil geoeléctrico del SEV-2 se observa hacia la parte superficial un primer comportamiento resistivo en el cual se definió un valor de resistividad de 40 ohm-m asociado con la presencia de la roca brechoide empacada en una matriz limo arcillosa, su espesor es de 6 m aproximadamente, subyaciéndole se observa un segundo comportamiento resistivo con un valor de 63 ohm-m, que presenta características muy homogéneas con respecto al estrato superior y al observado a profundidad en el SEV 1, este último valor de resistividad se asocia también con la presencia de la roca brechoide limosa y su espesor es mayor de 14m.

57



Exploración geofísica con 2 Sondeos Eléctricos Verticales SEV

Figura 21. Resultados de los sondeos eléctricos verticales SEV 1 y 2.

5. TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN.

El tratamiento de una cimentación mediante inyecciones se refiere a la serie de actividades que se requieren realizar para preparar el área en donde se desplantará la presa. Esas actividades dependen por un lado de las condiciones geológicas del sitio y por el otro, del tipo de cortina que se construirá. El objetivo principal de un tratamiento de cimentación es el de tratar de lograr una superficie de apoyo estable, de baja deformabilidad e impermeable con el objeto de poder garantizar la seguridad y funcionalidad de la obra. Antes de ello es necesario comprobar si el terreno de la zona en estudio es inyectable o no. Para esto se aplican diversos criterios. Frecuentemente se evalúa mediante pruebas de permeabilidad la inyectabilidad de un terreno según la magnitud de los valores de absorción tipo Lefranc; sin embargo hay que tomar en cuenta, que las suspensiones de cemento poseen propiedades reológicas totalmente distintas que las del agua. Esto explica por qué generalmente no existe una correlación entre la cantidad del agua absorvida durante la prueba y las cantidades de cemento inyectadas.

Además, es importante tener un conocimiento de la geometría de los posibles conductos de flujo, ya que mientras las juntas con apertura grande pueden inyectarse bien, las juntas medianas solamente pueden ser inyectadas parcialmente y las muy cerradas nunca se podrán inyectar con un cemento normal, aún cuando las cantidades de inyección resulten elevadas. Otro factor que influye de manera importante en la inyectabilidad es la presión de inyectado.

Existe una relación entre la presión requerida para que pueda penetrar una mezcla de cemento en una junta y su abertura: cuanto menor es la abertura de la junta, tanto mayor debe ser la presión de inyección, para que la suspensión pueda penetrar una distancia suficiente desde la perforación.

59

5.1 EXCAVACION Y PREPARACIÓN EN LA CIMENTACIÓN DE LA PRESA.

Para el desplante de la cortina inicialmente se llevó acabo una limpia general de la superficie del terreno dentro de las trazas exteriores de la presa, removiendo todo el material suelto, alterado y parte del aluvión del cauce. A fin de alcanzar la formación geológica sana se excavó una trinchera en el aluvión hasta la elevación 1577 msnm, en la que el ancho de la plantilla se fijó en razón de la traza del material; los taludes de esta trinchera se excavaron de acuerdo a la estabilidad del terreno. Encima de ésta superficie se colocó la losa de cimentación de concreto con un espesor de 0.5 m, para lograr una superficie uniforme de contacto. A partir de la superficie de esta capa de concreto se efectuaron las perforaciones de barrenación para el inyectado de la pantalla impermeable.



Fotografía 9. Desplante de la cortina.



Figura 22. Sección transversal de la presa.

5.2 PANTALLA IMPERMEABLE.

La construcción de una pantalla de inyectado parte de la suposición, de que durante el inyectado se forma un volumen de afectación cilíndrico alrededor de cada perforación. Cuando se colocan las perforaciones en serie a lo largo de una línea a una separación constante de tal forma de que se traslapen sus cilindros de influencia, se espera lograr un cuerpo tabular, que representa la pantalla de inyecciones, donde el terreno tiene una permeabilidad menor que el terreno original.

Para formar la pantalla impermeable en el depósito de aluvión inicialmente el número de líneas de inyección era (3 ejecutadas aguas arriba, desde la losa de desplante y 1 desde la galería de la presa), como solución final se decidió inyectar solo 2 líneas ejecutadas desde la losa de desplante a la elevación 1577.5 msnm, con separación sistemática entre barrenos de 2.0 m horizontalmente y desfasando los barrenos entre líneas para obtener una distribución en tresbolillo. La separación entre las líneas A (aguas arriba) y B (aguas abajo) fué de 1.75 m. El objeto de este arreglo fue el de concentrar la inyección en dos planos de pantalla constituidos por barrenos más cercanos. La distribución de barrenos se representa de manera esquemática en la figura 23.

La profundidad de los barrenos fué la misma que la del contacto aluviónformación Tlayécac, más 1.0 o 2.0 m penetrando en esta última. Por lo anterior, la profundidad de los barrenos fue variable y no constante. Por la naturaleza del depósito, se tuvo que emplear la técnica de inyección por medio manguitos. Esta técnica permitió además reinyectar algunos tramos de la pantalla. La mezcla de inyección empleada fue del tipo estable y fluida para su fácil manejo y penetración. La inyección de la lechada cemento-agua-aditivos se realizó introduciendo al terreno un volumen de 0.6 m³ de lechada por metro de barreno, en este caso, al inyectar un tramo, la presión de inyección se fue incrementando gradualmente hasta alcanzar solo la necesaria para introducir al terreno este volumen de mezcla. El volumen de inyección en el contacto aluvión-formación fue de 1.0 m³ por metro de barreno. Se inyectaron los barrenos de una misma línea en dos etapas, la primera (Etapa I) con separación a cada 4.0 m y la segunda (Etapa II) a cada 2.0 m. Se inyectaron primero los barrenos de la línea A, localizada aguas arriba.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los barrenos de exploración y durante la inyección de los primeros tramos de la pantalla en el aluvión, se decidió que el volumen antes anotado se podria disminuir o incrementar.



Figura 23. Pantalla Impermeable

5.3 PROCEDIMIENTO DE INYECCION Y TÉCNICA MANGUITOS.

El procedimiento de inyección mediante la utilización del tubo manguito¹² (patentado por la Sociedad SOLÉTANCHE), es el siguiente:

- a) Este tipo de dispositivo es muy versátil para dar tratamiento a suelos inestables por la diversidad en su granulometría.
- b) Consiste en un tubo de pvc de ½ a 2 pulgada de diámetro el cual tiene 4 perforaciones distribuidas a 90° en una misma sección y separadas a cada 50 cm de distancia entre secciones a lo largo del tubo. Cada grupo de agujeros está cubierto por un manguito o banda de hule que actúa como válvula, de tal manera que la mezcla de inyección puede salir del tubo pero no entrar en él.
- c) La perforación del barreno se realiza introduciendo un tubo de ademe provisional hasta la profundidad total dentro del aluvión.
- d) Mientras se retira el ademe provisional de la perforación se rellena el espacio anular que queda entre el terreno y el tubo de manguitos con una "vaina", utilizando una lechada estable de cemento en proporción 2.5:1 (agua:cemento) adicionada con un 20% de bentonita hidratada en peso del cemento.
- e) Durante la inyección del terreno se rompe la vaina utilizando la propia mezcla de inyección a presión, aislando un tramo del tubo de manguitos por medio de dos obturadores opuestos, en el tramo aislado queda una sección de perforaciones, figura 24.
- f) Se introduce la lechada al terreno por medio de una bomba de inyección que permite aplicar la presión especificada y la necesaria.

¹² Inyección de Suelos de Henri Cambefort. Barcelona 1968.

g) El tratamiento avanza por medio de progresiones ascendentes a cada 50 cm. el tratamiento de inyección puede repetirse en el mismo tramo varias ocasiones, ya que la tubería de inyección y el sistema de obturadores permite limpiar constantemente la tubería de inyección. Figura 25



Figura. 24 (según H. Cambefort 1968): Esquema del Doble obturador



Figura. 25 (según H. Cambefort 1968): Esquema del sistema de inyección con Tubo Manguito

Gracias a este dispositivo, la inyección puede comenzarse por el tramo que se desee. Suele tener interés comenzar por los tramos donde el terreno es más
permeable, una vez obturados éstos, la mezcla que se inyecte en las capas más próximas y de granulometría más fina no podrá aprovechar los niveles permeables para progresar hacia delante. Si durante el reconocimiento previo a la inyección se ha comprobado la existencia de capas de granulometría claramente diferente, con este procedimiento es fácil adaptar la mezcla a la granulometría de la capa. Por ejemplo, se podrá inyectar una lechada de arcilla-cemento en las formaciones más gruesas y gel de sílice en las arenas finas que no pueden inyectarse con arcillacemento.

En resumen, este método permite realizar una inyección correcta y relativamente económica en suelos granulares e incluso a gran profundidad, y además permite volver sobre cualquier punto de la pantalla para finalizar una impermeabilización si en la primera fase fue insuficiente o bien no se termino de inyectar.



1 – Perforación y encamisado
2 – Colocación del tubo manguito
3 – Colocación de la vaina entre el tubo manguito y la camisa
4 – Inyección por tramos entre el doble obturador

Figura. 26 (según Foundation Engineering, 1991): Secuencia de ejecución de la inyección utilizando el sistema del Tubo Manguito

5.4 DISEÑO DE LA MEZCLA.

Es importante precisar la composición de lechada que se puede inyectar en cada tipo de aluvión. Existe una relación entre las dimensiones de los granos del mortero y el medio a inyectar para que sea posible la inyección, al menos por impregnación y rotura. Debe aplicarse un criterio de inyectabilidad que permita relacionar el tamaño de las partículas del material a inyectar con el tamaño de las partículas que conforman la mezcla de inyección. Numerosos investigadores han tratado de determinar esta relación, haciendo penetrar la mezcla en "esqueletos" de granulometría diferente, colocados en tubos rígidos, como si fuera un ensayo de permeabilidad. Se ha elegido como criterio de inyectabilidad la granulometría determinada puede tener huecos de dimensiones más o menos grandes según el grado de compactación. Por lo tanto este criterio no resulta satisfactorio, y además, el ensayo de inyección no es totalmente representativo porque no toma en cuenta la elasticidad natural del terreno inyectado. Sin embargo, este criterio da una idea de las posibilidades de cada clase de mezcla de inyección. Figura 27.



Para la selección de la mezcla de inyección se revisaron las siguientes etapas de prueba en laboratorio:

Para definir la mezcla a emplear en el tratamiento de la cimentación de la presa, como primera etapa se determinaron las propiedades físicas (fluidez, densidad, sedimentación) para las mezclas relación agua - cemento (A/C) sin aditivos, con el objetivo de seleccionar la mezcla más estable (sin aditivos) y con fluidez. Bajo este contexto la mezcla más apegada a este concepto fue la de relación A/C=1.0 (ver tabla I).

Como segunda etapa utilizaron varios fluidizantes, con el objetivo de definir el

aditivo más eficiente para el tipo de cemento utilizado (Moctezuma tipo con Blaind entre 3900 y 4100 cm²/g según información proporcionada por el proveedor) y las características del agua del sitio (libre de materia orgánica).

Se selecciono el fluidizante Dispersil 7000 NL¹³ adicionado en diferentes proporciones (según recomendación del proveedor, desde 4.0 a 14.0 g/kg de cemento). Bajo este contexto se definen las características de las mezclas A/C con fluidizante variable, las cuales se resumen en la tabla II.

A/C	0.8	0.9	1.0		
AGUA = CEMENTO =	1.5 1.875	1.5 1.667	1.5 1.5	litros kg	
Vol. Mezcla	2.35	2.26	2.18	litros	
Fluidez Densidad Sedimentación qu 7 días qu 28 días	62.35 1.59 6.9	40.31 1.54 14.2	36.28 1.505 17.6	segundos g/cm³ % kg/cm² kg/cm²	
Temperaturas					
agua inicial lechada inicial lechada final	25.9 28.5 33.2	25.9 30.3 33.7	28.0 31.2 31.9	သံ သံ ဂ	
Alturas en probeta					
altura inicial Δh	36.7 2.54	36.0 5.1	36.7 5.5	cm cm	

Tabla I. Resultados de la mezclas sin aditivos.

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

CALIBRACION DEL EQUIP	O CON AGUA		
Fluidez	25.56	segundos	
Densidad	1.00	g/cm ³	
Temp. de agua	21.9	°C	

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

¹³ Sealcret de México S.A. de C.V. (Aditivos para Concreto)

Tabla II. Resultados de mezclas con A/C =1.0 y fluidizante a diferentes proporciones

A/C	1	1	1	1	1	1	
AGUA =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	litros
CEMENTO =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	kg
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0	cm ³
Vol. Mezcla							litros
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	4	6	8	10	12	14	cm ³ /kg cem.
Fluidez	33.62	32.5	33.66	31.25	32.37	32.84	segundos
Densidad	1.512	1.508	1.5	1.503	1.497	1.500	g/cm ³
Sedimentación	20.2	15.0	15.7	10.1	9.5	6.1	%
qu 7 días							kg/cm ²
qu 28 días							kg/cm ²
Temperaturas							
agua inicial	21.7	22.6	22.8	23.2	20.6	20.8	°C
lechada inicial	25.5	26	26.3	26.7	22.9	23.0	°C
lechada final	28.4	19.1	29.3	29.8	25.3	25.6	°C
Alturas en probeta							
altura inicial	37.2	36.7	35.0	36.0	37.2	36.7	cm
Δh	7.5	5.5	5.5	3.85	3.55	2.25	cm

las lecturas ∆h fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

CALIBRACION DEL EQUIP	O CON AGUA			
Fluidez	25.56			segundos
Densidad	1.00			g/cm ³
Temp. de agua	21.9			°C

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

El δ del Dispersil 7000 NL es de 1.195 g / cm³

El diámetro del orificio inferior del cono Marsh es de 0.44 cm,

En la tabla III se puede observar que la mezcla A/C=1.0 y una cantidad de Dispersil 7000 NL de 14.0 cm³/kg de cemento (21 cm³ para 1.5 kg de cemento de la dosificación propuesta ó 1.67% respecto al peso del cemento, definiendo una densidad del Dispersil 7000 NL de 1.195 g/cm³), se tiene una fluidez de 32.84 segundos (dentro de lo solicitado por diseño de 30 a 34 segundos) y una sedimentación de 6.10% (mayor que 5% de diseño como máximo).

Una vez que se seleccionó la mezcla señalada arriba, por proporcionar la fluidez

de diseño y muy buena estabilidad, se procedió a mejorar su estabilidad adicionando un estabilizador de volumen (Expansil) en diferentes porcentajes 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 % respecto al peso de cemento, esto con el objetivo de valorar el comportamiento de la mezcla con ambos aditivos y poder definir la mezcla de diseño. En la tabla III se muestran los resultados correspondientes, éstos se pueden resumir como sigue: la mezcla con relación A/C=1.0 con Dispersil 7000 NL (fluidizante) de 14.0 cm³/kg de cemento y 1% de estabilizador de volumen (Expansil)¹⁴ respecto al peso de cemento presenta una fluidez de 32.81 segundos (dentro de lo recomendado) y una sedimentación de 4.4% (menor a 5%), es decir, que se cumplen con los parámetros de diseño de la mezcla.

Como complemento se valoró el comportamiento de la fluidez en el tiempo, obteniendo los siguientes resultados: la fluidez de la mezcla se incrementó a 33.97 segundos desde los 15.0 a los 45 minutos, después de este tiempo y hasta los 120 minutos se alcanzó una fluidez de 34.56 segundos, considerándose éste último aceptable.

¹⁴ Sealcret de México S.A. de C.V. (Aditivos para Concreto)

A/C	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1		
AGUA =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	litros			
CEMENTO =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	kg			
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	21	21	21	21.0	21	CM3			
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	14	14	14	14	14	cm ³ /kg cem.		Determinación	n de la
Expansil (recomendado en %)	0.5	1	1.5	2	2.5	% respecto cemento		Fluidez a min.	después
Expansil a emplearse	7.50	15.00	22.50	30.00	37.50	gr	min.	mezcla 2	mezcla 4
Fluidez	30.57	32.81	32.22	32.5	31.75	segundos	15	33.97	34.75
Densidad	1.505	1.500	1.503	1.508	1.503	g/cm ³	30	33.97	34.75
Sedimentación	5.2	4.4	1.6 +	7.4 +	10.5 +	%	45	33.97	34.75
qu 7 días						kg/cm ²	60	34.56	34.75
qu 28 días						kg/cm ²	120	34.56	39.16
Temperaturas							min.	temperaturas	
agua inicial	20.8	21.2	20.6	22.6	21.0	°C	15	25.0	24.7
lechada inicial	23.6	24.4	23.9	24.5	24.1	°C	30	25.0	24.6
lechada final	26.2	26.3	26.4		26.7	°C	45	24.7	24.1
Alturas en probeta							60	24.4	23.8
altura inicial	37.2	36.0	36.7	37.2	35	cm	120	23.3	22.8
Δh	1.95	1.6	0.6 +	2.75 +	3.7 +	cm			
Nivel agua arriba del aforo	1.15 +	2.6 +	3.6 +	5.4 +	6.4 +	cm			
las lecturas Ab fueron a los 1'	20 minutos de l	rolocada la ler	hada en la nro	heta					

Tabla III. Resultado de mezclas A/C=1.0, Dispersil 7000 NL de 14cm3/kg de cemento y 1% de Expansil.

las lecturas ∆h fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

CALIBRACION DEL EQUIPO	CON AGUA				
Fluidez		25.56		segundos	
Densidad		1.00		g/cm ³	
Temp. de agua		21.9		°C	

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

Finalmente a la mezcla definida hasta esta etapa (que cumple con los requerimientos de diseño), se le adicionó silicato de sodio grado 43 en diferentes porcentajes (aditivo que permite acelerar el fraguado de la mezcla), ya que se requirió inyectar esta mezcla en la zona de contacto entre la formación y los depósitos de aluvión. El objetivo de esta etapa fué la de valorar la influencia del silicato de sodio en las características físicas de la mezcla inicial y en el tiempo. En la tabla IV se presentan los resultados correspondientes. Con estos resultados

se concluye que la mezcla que mantiene de manera razonable las características de diseño, es la mezcla con el 1% de silicato de sodio, es decir, que la fluidez después de los 15 minutos de fabricada la mezcla, se incrementa a 35.26 segundos y alcanza un valor de 38.50 segundos a los 120 minutos (2 horas).

Tabla IV. Resultados con A/C=1.0, Dispersil 7000 NL de 14cm3/kg de cemento, 1% de Expansil y Silicato de Sodio variable.

	Mezcla 2	Mezcla 2-1	Mezcla 2-2	Mezcla 2-3	Mezcla 2-4	
A/C	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
AGUA =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	litros
CEMENTO =	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	kg
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	14	14	14	14	14	cm ³ /kg cem.
Fluidizante (Dispersil 7000 NL) =	21	21	21	21.0	21	cm ³
Expansil (recomendado en %)	1	1	1	1	1	g/kg de cem.
Expansil a emplearse	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	gr
Silicato 43° (recomendado en %)	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	g/kg de cem.
Silicato 43° a emplearse		15.00	30.00	45.00	60.00	g
Fluidez	34.43	32.72	32.9	42.5	39.03	segundos
Densidad	1.5	1.493	1.5	1.497	1.5	g/cm ³
Sedimentación	5.9	4.1	6.0 +	4.4 +	8.1 +	%
qu 7 días	19.7	33.34	15.1	25.63	25.02	kg/cm ²
qu 28 días	78.88	77.77	51.29	68.99	88.33	kg/cm ²
No de Probeta	1,2,3,4	5,6,7,8	9,10,11,12	13,14,15,16	17,18,19,20	
Temperaturas						
agua inicial	22.0	22.1	21.8	21.8	22.2	°C
lechada inicial	24.7	24.8	25.2	25.1	25.0	°C
lechada final	26.3	25.0	25.0	24.5	24.4	°C
Alturas en probeta						
altura inicial	37.2	36.7	35.0	37.2	36	cm
Δh	2.2	1.5	2.1 +	1.65 +	2.9 +	cm
Nivel agua arriba del aforo	1.05 +	2.0 +	3.7 +	3.6 +	3.8 +	cm
las lacturas Ab fueron a los 120 m	vinutos do colo	codo la lochad	la on la probat	2		

MEZCLAS AGUA CEMENTO CON FLUIDIZANTE (DISPERSIL 7000 NL) Y EXPANSIL

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

CALIBRACION DEL EQUIPO CO	N AGUA			
Fluidez	25.56	segundos		
Densidad	1.00	g/cm ³		
Temp. de agua	21.9	°℃		

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

El signo positivo indica que la mezcla se dilata o se expande, ya que el nivel del agua de referencia se ubica arriba del inicial.

5.5 RESULTADOS DE INYECCIÓN.

La inyección se realizó introduciendo al terreno un volumen de 0.6 m³ de la mezcla estable seleccionada por metro de barreno, en este caso, al inyectar un tramo, la presión de inyección se incrementó gradualmente hasta alcanzar solo la necesaria para introducir al terreno el volumen especificado. Durante la inyección del tramo más cercano a la superficie, los primeros 3.0 m de cada barreno, se tomó un especial cuidado para evitar agrietamientos de la mampostería o en la losa de desplante.

Se inyectaron los barrenos de una misma línea en dos etapas, la primera (Etapa I) con separación a cada 4.0 m y la segunda (Etapa II) a cada 2.0 m. Se inyectaron primero los barrenos de la línea AL localizada aguas arriba y posteriormente los barrenos de la línea BL. Durante la inyección de la línea BL, el procedimiento fué similar al anterior, (introducir un volumen de 0.6 m³ de lechada por metro de barreno), excepto que la presión de inyección se limitó a 5 kg/cm², cuando se alcanzaba esta presión se suspendía la inyección.

El criterio para la evaluación del tratamiento fué el de la permeabilidad residual. Para esto, se realizaron uno o dos barrenos de prueba al final de la inyección, localizados en el centro de las dos líneas AL y BL y en ellos se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 5.0 m de longitud.

Se consideró satisfactorio el tratamiento cuando la permeabilidad residual obtenida estaba en el rango de 10⁻⁴ y 10⁻⁵ cm/s, similar a la que muestra la formación Tlayécac. Se debió tener especial cuidado de medir la permeabilidad en el contacto aluvión con la roca formación Tlayécac.

Línea "AL" (aguas arriba). Tabla V

Como ya se mencionó, quedó ubicada sobre el eje de la cortina, en esta línea se inyectaron 15 barrenos, las presiones empleadas para la inyección de lechada, quedaron registradas en el plano anexo (perfil de inyección línea AL). Debido a que las absorciones de lechada fueron muy variables se ilustran los resultados por tramos de 0.50 m, los volúmenes en m³ y presiones en kg/cm² para cada progresión y por etapas de inyección.

Barreno	Longitud del barreno [m]	Volumen de Inyección [m³]	Presión de Inyección [kg/cm²]
AL - 1	7.5	1.53	3
AL - 2	10.0	1.67	5
AL - 3	12.0	1.20	1
AL - 4	13.0	2.00	5
AL - 5	14.0	3.75	3
AL - 6	15.0	0.98	7
AL - 7	16.5	3.63	5
AL - 8	17.5	2.50	6
AL - 9	18.5	1.67	20
AL - 10	16.5	0.30	12
AL - 11	15.5	1.49	7
AL - 12	15.5	2.40	5
AL - 13	13.0	2.24	10
AL - 14	10.0	1.36	5
AL - 15	9.0	0.14	12
promedio gral.	13.6	1.79	7.07

Tabla V. Resumen Línea AL

MARGEN IZQUIERDA	AL-1	AL-2	AL-3 A	L-4 A	AL-5	AL-6	۹L-7 ،	AL-8 A	AL-9	AL-10	AL-11	AL-12	AL-13	AL-14	MARGEN AL-15 DERECHA
<u>0 m</u>	0-5-0	<u>-</u> s-o	0-5-0	0-5-0	0-0-0	0-5-0	0-5-0	<u>0-5-</u> 0	0-0-0	0-5-0	0-5-0	0-5-0	0-5-0	0-5-0	<u>0-5-0</u>
1	0-5-0	<u>0-5</u> -0	0-5-0	0-5-0	0-0-0	0-5-0	0-5-0	0-5-0	0-0-0	0-5-0	0-5-0	0-5-0	<u>0-5</u> -0	0-5-0	0-5-0
1 m	<u> </u>	<u>0-5</u> -0	<u>0-5</u> -0	0-5-0	<u>0-0</u> -0	0-30-0	<u>0-</u> 5-0	<u>0-5</u> -0	<u>0-0-0</u>	<u>0-5</u> -0	<u>0-</u> 5-0	0-5-0	<u>0-5</u> -0	<u>0-5</u> -0	<u>0-</u> 5-0
2	<u>110</u> -3-3	<u>120</u> -7-7	<u>0-</u> 5-0	0-5-0	<u>0-0</u> -0	0-30-0	<u>300</u> -18-5	<u>450</u> -10-6	440-20-12	<u>0-5</u> -0	<u>0-5-0</u>	<u>0-5</u> -0	450-10-8	<u>0-5</u> -0	<u>0-</u> 5-0
2 m	10-3-3	50-7-7	<u>30-</u> 1-1	0-5-0	150-5-5	0-28-0	<u>0-</u> 18-0	<u>0-</u> 10-0	30-27-30	<u>300</u> -12-9	<u>490</u> -10-5	0-5-0	0-25-0	<u>0-5</u> -0	90-20-10
2	<u>60</u> -9-5	<u>125</u> -5-5	60-1-1	<u>110</u> -10-6	<u>0-</u> 10-0	0-18-0	<u>10-</u> 18-0	<u>150</u> -20-5	750-22-20	<u>0-5</u> -0	<u>0-</u> 10-0	<u>450</u> -6-10	<u>0-</u> 20-0	<u>0-5</u> -0	0-22-0
3 M	0-19-0	<u>490</u> -15-11	10-1-1	0-20-0	450-5-5	0-18-0	<u>0-</u> 18-0	0-20-0	0-25-0	0-21-0	<u>240</u> -7-5	0-20-0	<u>0-3</u> 0-0	0-5-0	50-12-6
4	<u>300</u> -8-5	50-18-18	50-2-2	40-5-5	450-5-5	0-18-0	<u>390</u> -5-5	<u>610</u> -20-5	450-20-18	<u>10-</u> 20-0	0-25-0	0-20-0	<u>0-3</u> 0-0	<u>0-5</u> -0	<u>0-</u> 20-0
.4 m	0-25-0	750-10-5	0-25-0	30-9-6	<u>0-1</u> 0-0	0-18-0	<u>0-</u> 18-0	0-20-0	0-23-0	<u>10-</u> 30-0	<u>0-</u> 25-0	0-20-0	300-10-8	300-9-9	0-20-0
F	450-9-7	0-6-0	<u>0-</u> 25-0	0-5-0	<u>150</u> -5-5	610-20-7	<u>0-</u> 30-0	<u>70-</u> 10-8	<u>0-</u> 23-0	<u> </u>	<u>210</u> -10-5	0-20-0	440-20-5	460-5-5	<u>L₀-25-0</u> Aluvion
5 M	0-19-0	0-10-0	<u>0-</u> 22-0	450-9-6	450-5-5	0-18-0	150-5-5	40-11-11	<u>0-10-0</u>	<u>0-</u> 18-0	0-5-0	450-5-5	0-25-0	100-5-5	<u>0-</u> 24-0
,	<u>300</u> -10-5	80-10-10	<u>0-</u> 22-0	0-26-0	450-5-4	0-18-0	150-5-5	<u>0-1</u> 0-0	0-12-0	0-22-0	<u>0-</u> 25-0	360-14-13	560-15-10	0-12-0	0-20-0
<u>6 m</u>	300-18-5	0-10-0	450-5-5	0-26-0	<u>0-</u> 20-0	0-18-0	150-5-5	<u>0-1</u> 0-0	0-27-0	<u>0-</u> 20-0	<u>0-</u> 30-0	10-15-15	0-20-0	<u>500</u> -5-5	0-24-0
7	<u>0-</u> 10-0	<u>10-0</u> -0	<u>30</u> -5-5	460-10-6	450-5-4	0-18-0	150-5-5	<u>0-9</u> -0	<u>0-</u> 27-0	<u>0-</u> 20-0	<u>0-</u> 30-0	0-22-0	40-10-7	0-20-0	<u>0-</u> 20-0
/ m	- <u>10-</u> 10-0	<u>0-0-0</u>	0-20-0	450-25-10	450-4-4	0-18-0	150-5-5	0-22-0	0-27-0	0-28-0	<u>0-</u> 30-0	0-20-0	0-28-0	0-5-0	<u>0-</u> 20-0
	<u>10-</u> 10-0	<u> </u>	120-3-3	0-27-0	0-5-0	<u>37</u> 0-7-4	300-5-5	<u>0-</u> 24-0	0-25-0	<u>0-</u> 24-0	<u>0-</u> 30-0	0-20-0	450-10-8	<u>_0-20-0</u>	<u>0–</u> 20–0
<u>8 m</u>	Ψ	0-0-0	450-4-4	0-27-0	0-20-0	<u>0-</u> 18-0	450-5-4	<u>0-</u> 19-0	0-15-0	0-25-0	0-25-0	0-25-0	0-28-0	0-12-0	0-20-0
		0-0-0	0-8-0	0-27-0	450-3-3	<u>0-</u> 18-0	540-5-5	0-25-0	0-23-0	0-20-0	0-20-0	0-25-0	0-30-0	0-5-0	0-25-0
9 m	-	0-0-0	0-10-0	460-12-6	300-5-5	0-16-0	600-5-5	130-6-6	0-23-0	0-25-0	550-25-18	230-10-6	0-30-0	0-15-0	
		0-0-0	0-14-0	0-12-0	0-20-0	0-16-0	300-10-5	600-12-6	0-24-0	0-26-0	0-30-0	450-9-5	0-24-0	0-20-0	
10 n	<u>1</u>		0-18-0	0-23-0	0-20-0	<u>0-</u> 18-0	0-12-0	450-20-5	0-25-0	0-30-0	0-28-0	450-7-5	0-22-0	· ·	
			0-18-0	0-20-0	0-20-0	0-16-0	0-12-0	0-22-0	0-25-0	0-25-0	0-20-0	0-5-0	0-22-0		· ·
11.6	1	8	0-20-0	0-22-0	0-20-0	0-18-0	0-20-0	0-25-0	0-25-0	0-20-0	0-30-0	0-5-0	0-20-0		tm. Hayecác
			0-20-0	0-20-0	0-20-0	0-18-0	0-15-0	0-22-0	0-25-0	0-20-0	0-25-0	0-5-0	0-23-0		
12 n	2			0-20-0	0-20-0	0-18-0	0-5-0	0-25-0	0-25-0	0-30-0	0-30-0		0-21-0		
				0-20-0	0-20-0	0-18-0	0-20-0	0-25-0	0-25-0	0-10-0	0-28-0	0-5-0	0-22-0		
13 n	2				0-20-0	0-16-0	0-20-0	0-25-0	0-25-0	0-15-0	0-29-0	0-15-0	· ·		
					0-20-0	0-16-0	0-18-0	0-25-0	0-25-0	L0-10-0	L0-0-0	0-15-0			
14 n	2				-	0-17-0	0-20-0	0-25-0	0-23-0	0-15-0	10-0-0	0-15-0			
						<u>_0-1</u> 7-0	0-15-0	0-25-0	0-23-0	0-5-0	0-0-0	0-15-0			
15 n	2						0-20-0	0-20-0	0-22-0	0-7-0	10-0-0	0-15-0			
							0-20-0	0-20-0	0-24-0	-0-7-0	<u> </u>	<u> </u>	NOTA:		
16 r	מ						10-20-0	0-22-0	0-22-0	0-0-0				·	
							<u> </u>	0-21-0	0-21-0	<u> </u>			Volumon	Presion	Presión de
17 n	נ							0-20-0	0-24-0				volumen	Maxima 2	inyección 2
									0-23-0				300 lt –	10kg/cm	– 5Kg/cm
<u>18 n</u>	נ	÷ ÷							0-22-0				L		
									<u></u> .						
<u>19 n</u>	נ	4 · · · ·													
20 r	n							· ·							

Figura 28. Perfil de inyección en la Línea AL de la Pantalla Impermeable.

Se observa en general, que en la zona superior de los barrenos de la línea AL, el consumo de lechada fue nulo, la presión primero rompió la vaina, con presiones de bronqueo de unos 5 kg/cm², y después la presión podía aumentar sin consumo significativo de lechada. Lo mismo sucedió en los tramos más profundos, por ejemplo en el barreno AL-4, en la superficie no tomaron lechada los primeros cuatro tramos (bajo la losa de concreto), se tiene un tramo donde el suelo tomó 110 l/m, y después, en el siguiente tramo el barreno AL-4 el suelo no tomó lechada aunque la presión fue de hasta 28 kg/cm², cuando las presiones de bronqueo son del orden de 5 kg/cm² en general; y luego vienen dos tramos en donde el barreno AL-4 sí tomó lechada: 30 y 40 l/m, respectivamente. Lo anterior indica la heterogeneidad del depósito con presencia de estratos delgados o simplemente arenas finas rellenando los huecos entre los fragmentos de grava y boleos de roca. En la tabla VI del AL-1 a AL-15 se describen los volúmenes de obra

	AL	1	
Longitud	Volumen	Presión Máx.	Presión Mín.
[m]		[kg/cm]	
1.00	0	5	0
1.50	0	5	0
2.00	0.11	3	3
2.50	0.01	3	3
3.00	0.06	9	5
3.50	0	19	0
4.00	0.30	8	5
4.50	0	25	0
5.00	0.45	9	7
5.50	0.30	19	0
6.00	0.30	10	5
6.50	0.30	18	5
7.00	0	10	0
7.50	0	10	0
		prom	nedio
volumen total	1.83	10.53	2.20

Tabla VI. Consumo por barrenos de la línea AL

				AL	3	
			Longitud	Volumen	Max.	Min.
			[m]	[m³]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
			0.5	0	5	0
Al	-2		1	0	5	0
Volumen	Max.	Min.	1.5	0	5	0
[m ³]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	2	0	5	0
0	5	0	2.5	0.03	1	1
0	5	0	3	0.06	1	1
0	5	0	3.5	0.01	1	1
0.12	7	7	4	0.05	2	2
0.05	7	7	4.5	0	25	0
0.125	5	5	5	0	25	0
0.49	15	11	5.5	0	22	0
0.05	18	18	6	0	22	0
0.75	10	5	6.5	0.45	5	5
0	6	0	7	0.03	5	5
0	10	0	7.5	0	20	0
0.08	10	10	8	0.12	3	3
0	10	10	8.5	0.45	4	4
0	0	0	9	0	8	0
0	0	0	9.5	0	10	0
0	0	0	10	0	14	0
0	0	0	10.5	0	18	0
0	0	0	11	0	18	0
0	0	0	11.5	0	20	0
0	0	0	12	0	20	0
	prom	nedio			prom	nedio
1.67	5.65	3.65	total	1.2	11	0.92

Longitud [m]

0.5 1

1.5

2

2.5 3

3.5 4

4.5 5 5.5

6 6.5

7

7.5

8

8.5

9

9.5

10

total









Línea "BL" (aguas abajo). Tabla VII

Ésta línea quedó ubicada a 1.75 metros aguas abajo de la línea "AL" desfasando los barrenos en tres bolillo comprendido los cadenamientos 0+000 al 0+055. En esta línea se inyectaron 16 barrenos, las presiones empleadas para la inyección de lechada, quedan registraron en el plano anexo (perfil de inyección línea BL). Debido a que las absorciones de lechada fueron muy variables se ilustraron los resultados por tramos de 0.50 m, los volúmenes en m³ y presiones en kg/cm² para cada progresión y por etapas de inyección.

Barreno	Longitud del barreno [m]	Volumen de Inyección [m ³]	Presión de Inyección [kg/cm²]
BL - 1	9.5	1.06	5
BL - 2	10.5	1.09	5
BL - 3	13.5	1.80	5
BL - 4	13.5	0.84	5
BL - 5	13.5	0.76	5
BL - 6	15.5	5.43	5
BL - 7	18.0	1.62	4
BL - 8	16.5	1.39	5
BL - 9	18.5	0.50	4
BL - 10	17.0	0.68	4
BL - 11	15.5	0.48	4
BL - 12	14.5	1.31	10
BL - 13	13.5	1.04	5
BL - 14	11.5	2.98	4
BL - 15	9.5	1.00	5
BL - 16	9.0	0.00	0
promedio gral.	14.6	1.47	5.00

Tabla VII. Resumen Línea BL

IERDA					D 1 E					DI 40	DI 44	DI 10	DI 40	DI 44	DI 45	DEF
	BL-I E	SL-2	BL-3	BL-4	BL-5	BL-6	BL-/ B	SL-8	BL-9	BL-10	BL-11	BL-12	BL-13	BL-14	BL-15	BL-16
<u>0 m</u>	0-5-0:00	0-540	0-5-01	B	B	10-5-0	0-5-0	₽ • • • • - 5 - 0 * · ·	0-5-0	0-5-0 *	0 3 30-5-0	8	₽ 	1	0-5-0	
	0-5-0	-0-5-0	40-5-0	430-5-5	300-5-5		250-8-8	-0-5-0	-0-5-0	0-5-0	-0-5-0	40-5-0	<u>0</u> -7-0	450-5-5	-0-5-0	5-0
1 m	0-13-0	450-6-6	450-10-5	0-3-0	415-5-5	0-5-0	0-4-0	80-5-5	20-5-5	220-5-4	0-20-0	300-10-10	0-13-0	300-5-5	450-5-5	0-22-0
0	<u>0-</u> 13-0	<u>0-</u> 10-0	<u>0-4</u> -0	30-15-10	0-18-0	450-6-6	450-12-7	30-5-5	<u>0-</u> 14-0	10-22-15	70-25-5	<u>0-</u> 10-0	0-14-0	40-15-5	0-9-0	<u>0-</u> 20-0
2 m	0-12-0	<u>0-</u> 10-0	<u>410</u> -18-5	0-15-0	0-18-0	450-5-5	60-12-7	600-5-5	<u>150</u> -15-5	300-15-15	0-25-0	<u>0-</u> 10-0	0-14-0	<u>0-</u> 15-0	<u>0-9</u> -0	<u>0-</u> 28-0
2	0-18-0	<u>0-</u> 10-0	<u>290</u> -15-5	<u>0-</u> 25-0	<u>0-</u> 18-0	230-8-8	<u>0-</u> 20-0	<u>0-</u> 24-0	<u>0-</u> 18-0	<u>0-</u> 25-0	<u>0-</u> 18-0	<u>300</u> -10-10	<u>0-</u> 15-0	<u>0-1</u> 5-0	<u>0-9</u> -0	<u>0-</u> 25-0
3 M	0-18-0	<u>0-1</u> 0-0	<u>430</u> –10–5	0-25-0	<u>0-1</u> 8-0	<u>460</u> -8-8	0-22-0	0-20-0	<u>30-</u> 15-5	<u>150</u> –6–6	<u>0-</u> 20-0	¹ <u>0−</u> 18−0	<u>0-1</u> 8-0	<u>0-1</u> 0-0	<u>0-1</u> 0-0	0-22-0
4 m	0-20-0	40-5-5	20-12-5	<u>0-</u> 25-0	<u>0-1</u> 8-0	<u>0-</u> 20-0	<u>0-</u> 22-0	<u>0-</u> 20-0	<u>150</u> -15-5	<u>0-</u> 27-0	<u>0-</u> 20-0	<u>0-</u> 10-0	<u>0-</u> 18-0	<u>0-</u> 18-0	<u>100</u> -11-5	0-25-0
4 111	<u>0-</u> 17-0	0-8-0	<u>110</u> -9-5	0-25-0	50-18-5	<u>150</u> -13-12	0-22-0	<u>0-1</u> 0-0	<u>0-</u> 30-0	<u>0-</u> 22-0	220-5-4	450-10-8	<u>0-18</u> -0	<u>0-</u> 24-0	<u>0-1</u> 1-0	<u>0-</u> 15-0
5 m	<u>0-</u> 10-0	230-7-7	<u>0-9-0</u>	380-7-5	<u>0-0</u> -0	<u>0-1</u> 5-0	20-10-8	80-15-15	0-35-0	0-22-0	<u>0-</u> 18-0	125-15-15	<u>0-1</u> 8-0	0-22-0	<u>0-1</u> 5-0	<u>0-</u> 20-0
5	0-5-0	70-10-10	0-7-0	0-2-0	0-0-0	<u>600</u> -10-8	0-22-0	0-15-0	0-33-0	0-22-0	<u>0-</u> 18-0	0-27-0	0-18-0	430-5-5	450-11-5	<u>0-</u> 20-0
6 m	<u>50</u> -5-0	0-21-0	0-14-0	0-2-0	0-0-0	<u>300</u> -8-8	0-21-0	0-20-0	<u>0-</u> 30-0	0-25-0	<u>40</u> -15-5	<u>0-</u> 28-0	<u>0-</u> 18-0	0-20-0	0-11-0	0-20-0
	30-5-5	0-21-0	0-5-0	0-2-0	<u>0-0</u> -0	<u>450</u> -10-10	0-21-0	0-20-0	0-20-0	<u>0-</u> 25-0	0-30-0	0-27-0	<u>0-1</u> 8-0	0-20-0	0-11-0	0-22-0
7 m	220-10-5	<u>0-</u> 21-0	\ <u>0-5</u> -0	0-2-0	0-0-0	<u>450</u> -8-8	0-22-0	0-20-0	0-28-0	0-7-0	<u>150</u> -5-5	<u>60</u> -15-15	0-18-0	450-7-5	0-11-0	0-22-0
	380-5-5	300-6-6	<u>0−5</u> −0	0-2-0	<u>0-0</u> -0	480-10-8	0-22-0	20-20-20	0-29-0	<u>0-3</u> 0-0	<u>0-</u> 18-0	0-25-0	600-7-5	450-5-4	0-11-0	0-22-0
8 m	<u>380</u> -10-5	0-21-0	<u>0-5-0</u>	<u>0-</u> 2-0	<u>0-0-0</u>	<u>450</u> -7-7	<u>390</u> -5-5	<u>130</u> -6-6	<u>0-</u> 29-0	<u>0-</u> 27-0	<u>0-</u> 18-0	<u>0-</u> 25-0	<u>310</u> -18-5	410-5-5	0-15-0	<u>0-</u> 23-0
	0-15-0	0-21-0	<u>90-</u> 5-5	0-5-0	0-0-0	<u>600</u> -8-7	150-4-4	0-20-0	<u>0-</u> 28-0	<u>0-</u> 30-0	<u>0-1</u> 8-0	0-25-0	<u>0-18-0</u>	<u>450</u> -5-5	0-15-0	<u>0-</u> 23-0
9 m	<u>0-</u> 20-0	0-21-0	<u>+0-11-</u> Q	0-5-0	0-0-0	<u>360</u> -15-15	220-20-5	0-23-0	0-25-0	<u>0-</u> 32-0	<u>0-</u> 18-0	<u>0-</u> 25-0	130-18-5	<u>10-9-0</u>	<u>0-1</u> 5-0	<u>0-</u> 23-0
	0-25-0	0-21-0	<u>0-</u> 30-0	0-5-0	0-0-0	<u>0-10-0</u>	80-20-5	<u>450</u> -12-9	0-28-0	<u>0-</u> 30-0	<u>0-</u> 18-0	0-28-0	0-18-0	0-10-0	<u>h0-1</u> 5-0	u
10 m	Ĭ.	0-20-0	0-30-0	0-5-0	0-0-0	<u>0-5</u> -0	0-20-0	0-27-0	0-20-0	0-31-0	0-15-0	<u>10</u> -15-15	0-18-0	0-8-0		
		0-20-0	0-25-0	0-5-0	0-0-0	<u>0-4-0</u>	0-20-0	0-18-0	<u>0-22-0</u>	0-30-0	0-8-0	70-15-15	0-23-0	<u>0-1</u> 0-0		
11 m		Ĭ.	0-20-0	0-5-0	0-0-0	0-10-0	0-20-0	<u>0-1</u> 5-0	<u>150</u> -4-4	0-28-0	0-11-0	<u>0-</u> 11-0	0-30-0	<u>0-</u> 27-0		
			0-20-0	0-5-0	0-0-0	0-10-0	<u>0-2</u> 0-0	0-24-0	<u>0-3</u> 5-0	0-20-0	0-16-0	0-15-0	0-20-0	<u>0-</u> 27-0	fm Tla	10060
12 m			0-20-0	<u>0-5</u> -0	0-0-0	0-10-0	0-20-0	<u>0-</u> 20-0	<u>0-3</u> 0-0	0-29-0	0-25-0	0-11-0	0-20-0		IIII. IIU	yecuc
			0-20-0	0-5-0	0-0-0	<u>0-1</u> 0-0	10-21-0	0-20-0	<u>0-3</u> 2-0	0-29-0	0-20-0	0-11-0	0-20-0			
13 m			0-20-0	0-5-0	0-0-0	<u>0-1</u> 0-0	0-21-0	0-20-0	0-30-0	0-25-0	0-20-0	0-11-0	0-20-0			
			0-20-0	0-5-0	0-0-0	0-10-0		0-20-0	0-30-0	0-8-0	0-20-0	<u>0-1</u> 1-0	0-20-0	·		
14 m						0-10-0	0-21-0	0-20-0	0-30-0	<u>8-10-0</u>	0-20-0	0-20-0	NC	DTA:		
						0-10-0	0-21-0	0-20-0		0-10-0	0-20-0	0-20-0	Г		Dunaián	Duration
15 m						0-10-0	₽ <u></u>	0-20-0	0-30-0	0-10-0	0-20-0			/olumen	Máxima	Invession
						<u>0-1</u> 0-0	<u>0-2</u> 1-0	<u>0-</u> 20-0	0-30-0	0-10-0	0-20-0				2 (²	2
<u>16 m</u>				· ·		Ι.	<u>0-2</u> 1-0	0-20-0	0-30-0	0-10-0				300 lt -	10kg/cm -	5Kg/cm
							0-21-0	0-20-0	0-30-0	0-10-0						
17 m							0-21-0		0-30-0	<u>0-1</u> 0-0						
10									0-30-0							
18 m				· ·			<u>H0-21-0</u>		₽ <u> </u>							

Figura. 29 Perfil de inyección en la Línea BL de la Pantalla Impermeable.

En la tabla VII de BL-1 a BL-16 se describen los volúmenes de obra ejecutados para cada uno de los barrenos de la línea BL.

BL-1						
		Presión	Presión			
Longitud [m]	Volumen [m³]	Máx. [kg/cm ²]	Mín. [kg/cm ²]			
0.50	0	5	0			
1.00	0	5	0			
1.50	0	13	0			
2.00	0	13	0			
2.50	0	12	0			
3.00	0	18	0			
3.50	0	18	0			
4.00	0	20	0			
4.50	17		0			
5.00	.00 0 10		0			
5.50	0	5	0			
6.00	0.05	5	0			
6.50	0.03	5	5			
7.00	0.22	10	5			
7.50	0.38	5	5			
8.00	0.38	10	5			
8.50	0	15	0			
9.00	0	20	0			
9.50	0	25	0			
		promedio				
volumen total	1.06	12.16	1.05			

Tabla VII. Consumo por barrenos de la línea BL











5.6 VERIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO.

Se perforaron 3 barrenos de verificación con recuperación de núcleos y ejecución de pruebas de permeabilidad tipo Lefranc⁴. Se hicieron tres barrenos para la verificación de la permeabilidad, entre las líneas de inyección AL y BL, la ejecución se llevó acabo con recuperación de núcleos para constatar el tipo de terreno en que se hizo la prueba. Los tres barrenos fueron perforados hasta 10.5m de profundidad, es decir, 10 m bajo la base de la losa de concreto de cimentación de la cortina. La localización de los barrenos de verificación se ubicaron con referencia a los barrenos de inyección cercana a las líneas AL y BL.

Barreno de verificación No. 1 BL-6 Barreno de verificación No. 2 AL-10 Barreno de verificación No.3 BL-14



Figura. 30 Pantalla Impermeable

⁴ Prueba Lefranc – Mandel. Normas ASTM y AFNOR

El criterio para la aceptación del tratamiento es el de la permeabilidad residual. Para esto, se realizarón tres barrenos de prueba al final de la inyección, localizados en el centro de las dos líneas AL y BL donde se realizarón tres pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 5.0 m de longitud. Se consideró satisfactorio el tratamiento cuando la permeabilidad residual obtenida estaba en el rango de 10⁻⁴ y 10⁻⁵ cm/s. Se tuvó especial cuidado al medir la permeabilidad del contacto del aluvión - Formación Tlayécac.

Terminada la perforación de los barrenos, se lavó perfectamente el sondeo, y se dejó reposar durante un periodo mínimo de 12 horas o hasta que el NAF se estabilizó de acuerdo con las condiciones especificas del sitio, para ver las fluctuaciones del nivel del agua en el interior del barreno y para asegurar la posición del nivel freático NAF dentro del barreno. Conocida la posición del NAF en cada barreno de verificación, se procedió a efectuar la prueba de permeabilidad manteniendo la carga hidráulica constante con respecto a la posición del NAF, hasta alcanzar la presión equivalente de 15 m. de columna de agua, o sea, 1.5 kg/cm². Se tomaron cuidadosamente las lecturas de tiempo, el gasto ó volumen de agua inyectado al terreno a la presión de 1.5 kg/cm².

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 1 se muestran en la tabla VIII:

Se puede observar que la permeabilidad fue de $5x10^{-4}$ a $7x10^{-4}$ cm/s en toda la longitud por lo que se considera que es tolerable estos valores.

93

Barreno de Verificación No.1 (BL-6) Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc						
Profi [ındidad [m]	Pi =1.5				
de:	a:	(kg/cm²)	k (cm/s)			
0.92	4.32	CC	5.05E-04			
4.32	7.32	CC	5.11E-04			
7.32	10.32	CC	7.00E-04			

Tabla VIII. Resumen de resultados de permeabilidad

CC: prueba con carga constante Pi: carga hidráulica k: coeficiente de permeabilidad

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 2 se muestran en la tabla IX:

Se puede observar que la permeabilidad fue de 2.9×10^{-4} a 5.5×10^{-4} cm/s en toda la longitud por lo que se considera que es aceptable estos valores.

Barreno de Verificación No.2 (AL-10) Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc						
Profundidad						
-	[m]	Pi =1.5				
de:	a:	(kg/cm²)	k (cm/s)			
1.30	4.30	CC	3.13E-04			
4.30	7.30	CC	2.98E-04			
7.30	10.30	CC	5.55E-04			

Tabla IX. Resumen de resultados de permeabilidad

CC: prueba con carga constante Pi: carga Hidráulica k: coeficiente de permeabilidad

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 3 se muestran en la tabla X:

Se puede observar que la permeabilidad fue de $7x10^{-5}$ a $8.1x10^{-5}$ cm/s en toda la longitud por lo que se considera que son admisibles estos valores.

Barreno de Verificación No.3 (AL-14) Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc						
Profu [1	ndidad n]	Pi =1.5				
de:	a:	(kg/cm²)	k (cm/s)			
1.8	3.15	CC	7.04E-05			
3.15	6.8	CC	No hubo consumo de Gasto			
6.8	10	CC	8.16E-05			

Tabla X. Resumen de resultados de permeabilidad

CC: prueba con carga constante Pi: carga Hidráulica k: coeficiente de permeabilidad

Como conclusión de las pruebas de verificación se tiene que en el área del aluvión la permeabilidad residual entre las dos líneas de la pantalla impermeables es de 3.37×10^{-4} cm/s en promedio. Este valor es 2 veces menor que la permeabilidad original del aluvión 1×10^{-4} cm/s.

6. CONCLUSIONES.

Se realizaron estudios especiales del Proyecto Ejecutivo de la Presa de Almacenamiento Socavones, con el objetivo de verificar y conocer con mayor precisión la estratigrafía y las propiedades mecánicas del subsuelo sobre el cual se construyo la cortina de la presa. Para este efecto, por una parte los sondeos exploratorios directos efectuados con herramienta de muestreo y recuperación de muestras, en conjunto con los estudios de investigación geosísmica, TRS, downhole y SEV, ha sido posible determinar lo anterior para la columna estratigráfica del subsuelo hasta la Elev. 1530 msnm que corresponde a una profundidad de 50 m bajo la losa de cimentación de concreto de la cortina de la presa. Asimismo, se determinó la permeabilidad por tramos de 1.50 m dentro de la parte que ocupa el depósito de aluvión, y en tramos de 0.50 m en la Fm. Tlayécac. Además, se midió la permeabilidad promedio en la parte de interés del flujo de agua bajo la presa, es decir, entre la cimentación y 1.25 H que corresponde a 25 m de profundidad bajo la cimentación. La exploración geotécnica y geofísica, ha permitió definir con mayor precisión el perfil estratigráfico que ha servido como base para los análisis de seguridad de la cortina de la presa, así como para la revisión y, en su caso ajustes continuos de la construcción de la Pantalla Impermeable de la presa. En la fig. 25 se muestra la estratigrafía con el contorno del contacto aluvión-Fm. Tlayécac empleado para diseño de la Pantalla Impermeable.



Fig. 25 Estratigrafía de la boquilla de la P.A. Socavones

- El tratamiento de la cimentación mediante la Pantalla Impermeable es adecuado y eficiente; además, la profundidad del tratamiento de 5 m fue adecuada porque el terreno de la cimentación así mejorado es similar a un macizo rocoso.
- 2) En cuanto a la Pantalla Impermeable, las inyecciones de lechada de cementoagua-aditivo han demostrado su efectividad. En la Pantalla Impermeable, en la Línea AL la mayor parte de los consumos que se tuvieron en esta línea, están

limitados a una profundidad de 10.0 a 11.0 m. Debajo de esta profundidad los consumos fueron nulos de manera sistemática. Esto se relaciona con la posición del contacto aluvión – Fm. Tlayécac. Los barrenos que tuvieron mayor consumo de lechada se encuentran del lado de la margen izquierda, mientras que los barrenos ubicados entre el centro del cauce y la margen derecha, los consumos generales fueron más uniformes en el rango de 1000 a 2000 litros por barreno.

- En la línea BL los barrenos presentan un consumo más uniforme, con excepción del barreno BL-6 que presentó un consumo total de 5430 litros distribuidos a lo largo de toda la perforación.
- 4) El consumo total de lechada de cemento : agua : aditivo súper-plastificante / fluidizante de las inyecciones a presión para la construcción de la Pantalla Impermeable ha sido de 43,245 litros (43 m³), correspondiendo 22,975 litros a la Línea AL (23 m³), y los restantes 20,270 litros a la Línea BL (20 m³).
- 5) Como se había previsto, el consumo de los barrenos de inyección en la línea BL es ligeramente menor, en un 12%, que el consumo en los barrenos de inyección de la línea AL, lo cual es lógico ya que no podía esperarse un valor mayor dado que la línea BL no está confinada hacia aguas abajo, sin embargo está lo suficientemente cerca de la línea AL como para recibir los beneficios que da al terreno la inyección de ésta.

BIBLIOGRAFÍA

Cambefort H. "Inyección en Suelos". Ed. Omega, Barcelona 1968.

Cambefort H. "Perforaciones y Sondeos" Ed. Omega, Barcelona 1962

Comisión Federal de Electricidad (1980).Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotécnia Propiedades Físicas y mecánicas de los suelos.

Escamilla, J. M. "Tratamientos de consolidación e impermeabilización de suelos y rocas. Técnicas de Diseño, Construcción Control". Solum, S.A., México, 1974.

Foundation Engineering. Handbook 1991. Capítulo: "Soil Stabilization and Grouting". Ed: Hang Fang.

Juárez Badillo E. y Rico Rodriguez A. "Fundamentos de Mecánica de Suelos". Ed. Limusa, México, 1975.

Juárez Badillo E.; Tamez, Enrique; Habib, Pierre y Mayer, Armand "Seminario sobre Mecánica de Rocas y Suelos". Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1963.

Krynine, Dimitri P. y Judd, William R. "Principios de Geología y Geotécnia para ingenieros". Ed. Omega, Barcelona, 1975.

Legget, Robert F. "Geología para Ingenieros". Ed. G. Gili, 1964.

Marsal, Raúl J. y Resendiz, Daniel N. "Presas de tierra y enrocamiento". Ed. Limusa, México, 1975

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos "Manual de Construcción Geotécnica". México 2002

Tamez, Enrique (1987). Manual de Diseño Geotécnico. Vol. 1 COVITUR.

Tercer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Caracas, Julio 1967. "Impermeabilización de un Aluvión de Granulometría Fina"

Terzaghi, K. y Peck R. B. "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica". Ed. Ateneo. Buenos Aires 1973.