

## Pantalla flexo-impermeable para remediación de suelos contaminados en la Refinería 18 de Marzo, en la ciudad de México

Plastic slurry wall for remediation of contaminated soils in the Refinery 18 de Marzo, in Mexico City

**Walter Paniagua**, Pilotec  
**José Alberto Valle**, Pilotec  
**Asael Elvira**, Pilotec

**RESUMEN:** Como parte de los trabajos de remediación de suelos que se llevan a cabo en la antigua *Refinería 18 de Marzo*, en la ciudad de México, se describe el diseño y construcción de una pantalla flexo-impermeable, formada con bentonita-cemento-agua, excavada en un perímetro de 1,200 m de longitud, hasta 12 m de profundidad. Asimismo, se comentan diversos aspectos particulares que se encontraron durante la construcción de la pantalla, tales como interferencias subterráneas y agrietamiento del suelo.

**ABSTRACT:** As part of soil remediation actions, in former *18 de Marzo Refinery*, in Mexico City, in this paper is described the design and construction of a plastic slurry wall, with 1,200m length, up to 12 m depth. Issues founded during wall construction are mentioned, as underground interferences and soil cracks.

### 1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de México es testigo de uno de los procesos de saneamiento más importantes a nivel mundial: en el terreno que durante décadas albergó la operación de la Refinería 18 de Marzo, en Azcapotzalco, después de un trabajo de remediación del suelo, se convertirá en el Parque Bicentenario.

En 1933, antes incluso de la expropiación petrolera, la compañía *El Águila* puso en operación una refinería, la cual fue cerrada en el año 1991.

Durante 16 años la mayor parte del terreno quedó inutilizado, siendo hasta 2007 cuando se decidió la construcción del Parque Bicentenario.

Es así que PEMEX donó el terreno y se comprometió a realizar acciones de remediación ambiental para entregar totalmente saneado el predio de 55 ha, apto para el futuro esparcimiento. En la figura 1.1 se muestra la vista general del sitio.

Entre 1991 y 2007, Pemex Refinación realizó diversas acciones relativas al desmantelamiento y limpieza de la ex refinería entre las que destacaron: recuperación de hidrocarburos en fase libre, reubicación de plantas de proceso, desmantelamiento de instalaciones, recuperación de emulsiones agua-aceite y retiro de tanques subterráneos.



Fig. 1.1, Vista general del sitio

La remediación o saneamiento es el conjunto de medidas que se someten los sitios contaminados, para eliminar o reducir los contaminantes a un nivel seguro para la salud y el medio ambiente.

En este trabajo se describen parte de las obras ejecutadas con este propósito; en particular, la construcción de una pantalla impermeable en una zona del proyecto, con el propósito de cortar el flujo de agua subterránea dentro del área de suelo remediado.

### 2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO (PEMEX, 2009)

Se proyecta la construcción de un conjunto recreacional, dentro del cual se tendrá un acuario, foros culturales y un museo, así como servicios, áreas verdes, andadores y vialidades.

Para proceder a la remediación, en 2006 se realizó la primera caracterización formal del terreno.

La caracterización permitió determinar la situación detallada de los suelos de la ex refinería e identificar siete zonas de acuerdo con la naturaleza de los contaminantes, sus concentraciones y la profundidad a la que se encuentran, las cuales se muestran en la figura 12.



Fig. 1.2, División de áreas consecuencia de la caracterización de suelos

A su vez, las siete zonas de trabajo quedaron divididas en dos fases.

Las zonas 2, 3 y 4 integraron la fase 1 de remediación, equivalentes a 22 ha, que concluyó en septiembre del 2008. Las zonas 5, 6 y 7 integraron la fase 2 de remediación, equivalentes a 33 ha.

La zona 1 registró niveles de contaminación por debajo de la norma, por lo que no fue necesaria su remediación.

Las tecnologías de remediación se establecieron con base en la caracterización del subsuelo y en la evaluación de protección a la salud humana.

Las técnicas de remediación que están aplicándose, y en proceso de aplicación y que han sido avaladas por la autoridad ambiental son: biorremediación, biopilas, extracción de vapores, bioventeo (*bioventing*); para benceno - *air sparging* (burbujeo).

Con el propósito de cortar el flujo horizontal de agua contaminada con algunas sustancias químicas, se construyó una pantalla impermeable; formada con una mezcla de cemento-agua-bentonita (lodo fraguante). La pantalla impermeable es de 1,200 m de longitud, con un ancho de 0.6 m y con una profundidad variable de 6 a 8.5 m, con un total de 5,400 m<sup>3</sup> de volumen de excavación; en la fig. 2.1 se muestra la localización y trayectoria de la pantalla en línea blanca.



Fig. 2.1, Trayectoria de la pantalla impermeable

### 3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO

Se realizaron estudios geotécnicos en la zona, así como los trabajos de exploración y muestreo ambiental dentro del predio en estudio (TGC, 2005).

**Zonificación geotécnica.** El predio se localiza en la zona de transición, que corresponde al límite entre la zona lacustre y la de lomas, caracterizada por la presencia de suelos aluviales y arcillosos, de disposición y espesor erráticos.

**Condiciones hidráulicas de la zona.** La zona en estudio se caracteriza por presentar variaciones importantes en la profundidad del nivel de agua freática, de acuerdo con los reportes de la Comisión de Aguas del Valle de México. Las mediciones efectuadas indican que en la fracción norte se detecta entre 2.5 y 4.0 m mientras que en el resto del predio se detecta a 5.0 m de profundidad, y que se trata de un manto colgado de agua.

**Agrietamiento.** En la zona se viene presentando el fenómeno de agrietamiento del subsuelo atribuible a diferentes causas tales como la extracción de agua y el secado solar.

**Hundimiento regional.** La explotación de mantos acuíferos para el suministro de agua potable a la ciudad de México, ha venido provocando el abatimiento de los niveles de agua, efecto que genera el hundimiento regional que son los asentamientos que sufren los suelos arcillosos por el bombeo y que en la zona entre 1985 y 1995 fue de 2 cm/año (Santoyo E., et al, 2005).

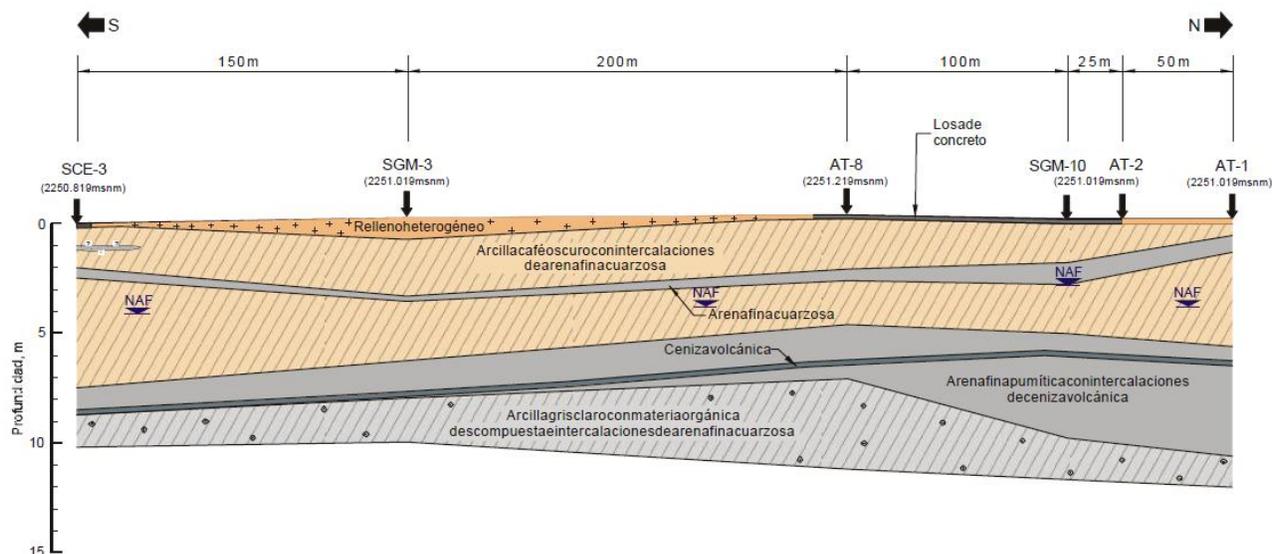


Figura 3.1, Perfil estratigráfico del sitio

Con la información recopilada y adquirida de la zona, se define la siguiente secuencia estratigráfica, figura 3.1:

De 0.0 hasta 1.0 m, estructura de piso o pavimento conformada por materiales compactados arenosos y arcillosos con fragmentos de concreto.

De 1.0 a 12.0 m en la fracción Oriente y hasta 7.0 m en el resto del predio, arcilla café grisáceo y gris oscuro de origen lacustre, con contenido variable de arena fina cuarzoza y pumítica, ceniza volcánica y materia orgánica.

De 7.0 a 25.9 m, arenas finas cuarzozas y andesíticas, con intercalaciones de arena pumítica gris y de ceniza volcánica, correlacionable con la Capa Dura. En la frontera superior con la arcilla, se detectó fuerte olor de hidrocarburo.

#### 4 DISEÑO DE LODO FRAGUANTE

El cuerpo de la pantalla impermeable está formado por lodo fraguante, cuya característica principal es la baja permeabilidad, para con ello se garantizar cortar el flujo horizontal de agua contaminada.

Para llevar a cabo la elaboración de las mezclas de prueba (Cuevas y Asociados, 2009), se realizó el muestreo del agua del nivel freático contaminada con hidrocarburos y otras sustancias químicas, con el propósito de mantener las muestras saturadas y con ello simular las condiciones reales de trabajo.

En el laboratorio, las muestras fueron preparadas siguiendo el siguiente procedimiento:

**Hidratación de la bentonita.** Una vez definidas las proporciones de bentonita con respecto al agua, se mezclaron en un recipiente y se agitaron por espacio de algunos minutos; posteriormente se dejó en reposo durante un lapso de al menos 18.0 hrs, con el propósito de que se hidrate.

**Incorporación de cemento.** Una vez que la bentonita ha fue hidratada, se adicionó el cemento portland con la proporción correspondiente, homogenizándolo por batido hasta deshacer todos los grumos, el agitado se suspende una vez que la mezcla tomó una coloración uniforme.

**Elaboración de probetas.** Posterior a la incorporación del cemento y homogenización de la mezcla, se procedió con el vaciado del lodo en los moldes acondicionados para este fin; consistentes en tramos de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro ranurados en toda su longitud y dispuestos en un recipiente que contenía agua procedente del nivel freático muestreada en el sitio.

**Curado de muestras.** Las probetas se curaron de forma automática al estar parcialmente sumergidas dentro del agua procedente del nivel freático; sin embargo, la parte no sumergida se hidrató constantemente para evitar que la probeta se reseque.

Los ensayos a que fueron sometidos los lodos fueron:

**Viscosidad Marsh.** Se define como el tiempo necesario, expresado en segundos, para que un volumen de lodo de 946 cm<sup>3</sup> escurra a través de un orificio circular de 5 mm.

**Densidad.** Se determina mediante una balanza de lodos, la cual consiste en un recipiente cilíndrico de 150 cm<sup>3</sup> de capacidad, donde se vacía cuidadosamente una muestra de lodo, en el otro extremo se encuentra la balanza, cuyo equilibrio define la densidad.

**Ensaye de compresión simple.** Los especímenes elaborados se someten a la prueba de compresión simple a 7, 14 y 28 días de edad, con el propósito de verificar la resistencia al esfuerzo cortante para los diferentes proporcionamientos; para ello se utilizó una presa hidráulica cuya capacidad es de 1.0 ton.

**Ensaye de consolidación unidimensional.** Una vez que las probetas cumplen 28 días de edad se realizan los ensayos de compresibilidad correspondientes, con los que se determina la deformabilidad y permeabilidad de las mezclas.

Los resultados de los ensayos descritos anteriormente se presentan en el Anexo 1. En términos generales las mezclas de lodo fraguante bentonítico realizadas tienen una permeabilidad muy baja, con coeficientes de permeabilidad entre  $2.3 \times 10^{-7}$  y  $3.0 \times 10^{-9}$  cm/s; por aspectos económicos se usó la de 150 kg de cemento por m<sup>3</sup> de agua (Mezcla 1), que además resulta ser la más flexible (Cuevas y Asociados, 2009).

## 5 CONSTRUCCIÓN DE PANTALLA IMPERMEABLE

**Construcción de pantalla.** La pantalla impermeable se construyó excavando una zanja vertical estrecha, a través de los materiales permeables hasta los estratos subyacentes relativamente impermeables (Pilotec 2009).

El material excavado fue sustituido por una mezcla de cemento-bentonita-agua (lodo fraguante), cuyo diseño se señaló en el apartado anterior.

**Muros guía (brocales).** En este proyecto se prescindió de su uso, debido a que el trazo se localizó en una zona donde había sido colocado previamente un firme de concreto, como se muestra en la figura 4.1.

En algunas zonas, la pantalla se construyó desde el nivel de la superficie de trabajo (Alternativa "A"); en otras, se excavó previamente una zanja de aproximadamente 2.0 m de profundidad (Alternativa "B"), y se excavó la pantalla como se muestra en la figura 4.2.

**Cuerpo de la pantalla.** La excavación de la zanja se realizó utilizando el mismo lodo fraguante que conformó el cuerpo de la pantalla, como fluido estabilizador.



Figura 4.1, Construcción de pantalla con firme de concreto como brocal

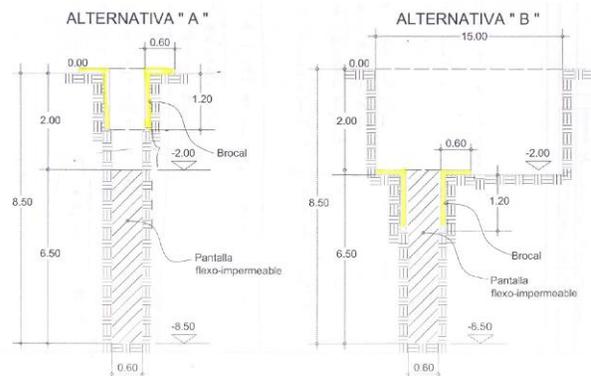


Figura 4.2, Alternativas para construcción de pantalla

**Excavación de pantalla.** Para poder garantizar la verticalidad de la pantalla, cada panel se excavó en posiciones alternas; en la figura 4.3 se presenta la secuencia de excavación de un panel, aunque las distancias variaron en función de la cantidad de "mordidas" que la almeja da para formar un módulo – primario o secundario.

La secuencia de excavación fue la siguiente:

- Excavación de un módulo primario
- Excavación de un segundo módulo primario separado del primero
- Excavación del módulo secundario

De la figura 4.3, se observa que los dos módulos primarios tienen el ancho de la herramienta de excavación y el peso de la herramienta, permite garantizar la verticalidad de la zanja. Al realizar la excavación del módulo secundario, se completa un panel.



Figura 4.3, Secuencia de excavación de pantalla

En la figura 4.4, se muestra la excavación que se realizó con una almeja hidráulica con Kelly entero; su mayor ventaja es la precisión con la que pueden operar y realizar la excavación de la zanja.

**Preparación de lodo fraguante.** Se inició mezclando agua fresca y bentonita, por medio de un mezclador de chiflón.

**Incorporación de cemento.** Una vez que el lodo bentonítico fue fabricado, con una bomba centrífuga se envió a un tanque mezclador donde se le incorporó el cemento en la cantidad proyectada, realizando un batido energético, hasta garantizar una homogeneización de la mezcla.

El batido se realizó con agitadores de paletas movidos por un motor, como se muestra en la figura 4.5.

Se midieron en campo las propiedades de lodo fraguante con los métodos descritos anteriormente : viscosidad y densidad.

**Agrietamientos y caídos en la ejecución de la pantalla.** En algunas zonas, debido a la mala compactación de diversos rellenos, durante la excavación de las zanjas, se presentaron caídos y agrietamientos en con longitudes promedio entre 5m y 8m con 4.50m de profundidad, como se muestra en la figura 4.6. El problema se solucionó sustituyendo y mejorando el terreno en un área de 10 m x 31 m y una profundidad de 4m, compactando en capas de

50 cm hasta llegar al nivel terreno natural para posteriormente excavar con la almeja hidráulica las zonas afectadas.

**Localización de tuberías.** Además se encontraron tuberías antiguas que obstruían en las zanjas, pero éstas fueron removidas previamente, para posteriormente continuar con las excavaciones de la pantalla.



Figura 4.4 Excavación de pantalla con almeja hidráulica con Kelly entero.



Figura 4.5, Mezcladora de lodo fraguante

## 6 COMENTARIOS FINALES

Se presenta el proyecto de una pantalla impermeable en un predio, el propósito de cortar el flujo horizontal de agua contaminada con algunas sustancias químicas; en éste predio se realiza el proyecto de mejoramientos de suelo con el objetivo de construir un área de esparcimiento familiar.

Se describe el diseño de lodos que conformaron la pantalla, así como su procedimiento constructivo, y los

inconvenientes presentados durante su ejecución, como fueron los caídos y agrietamientos en la excavación, y la localización de tuberías antiguas.



Fig. 4.6, Agrietamientos y caídos en zanjas

## REFERENCIAS

Cuevas y Asociados (2009), “Diseño de mezclas de lodo fraguante bentonítico y espontáneo para la construcción de una pantalla flexoimpermeable, que se proyecta en el predio de la exrefinería Azcapotzalco, Delegación Azcapotzalco”, México D F

PEMEX (2009), “Remediación del predio Norte de la ex Refinería 18 de Marzo”, Nota Informativa, México, D.F.

Pilotec (2009), “Especificación de construcción de pantalle impermeable”, México, D.F.

Santoyo E., et al (2005), “Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México”, México, TGC Geotecnia.

TGC (2005), “Condiciones geotécnicas preliminares Exrefinería 18 de marzo, Azcapotzalco”, México, D.F.

## ANEXO 1

MEZCLA	PROPORCIÓN	VISCOSIDAD MARSH, seg		DENSIDAD, t/m <sup>3</sup>		RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE, kg/cm <sup>2</sup>			E <sub>50</sub> , kg/cm <sup>2</sup>	K, cm/seg		
		Lodo bentonítico y/o espontáneo	Lodo fraguante	Lodo bentonítico y/o espontáneo	Lodo fraguante	7 días	14 días	28 días				
1	1.0 m <sup>3</sup> agua 50 kg bentonita 150 kg cemento 6.0 kg imper int	39.0	40.0	1.06	1.12	0.17	0.19	0.25	33.1	2.32x10 <sup>-7</sup>		
2	1.0 m <sup>3</sup> agua 50 kg bentonita 175 kg cemento 7.0 kg imper int		42.0		1.13	0.22	0.30	0.37			35.1	2.67x10 <sup>-8</sup>
3	1.0 m <sup>3</sup> agua 50 kg bentonita 200 kg cemento 8.0 kg imper int		44.0		1.14	0.31	0.40	0.47				
4	1.0 m <sup>3</sup> agua 1,000 kg arcilla 150 kg cemento 6.0 kg imper int	37.0	45.0	1.35	1.39	0.23	0.51	0.60	42.4	4.03x10 <sup>-9</sup>		
5	1.0 m <sup>3</sup> agua 1,000 kg arcilla 150 kg cemento 7.0 kg imper int		46.0		1.47	0.34	0.56	0.74			53.8	1.01x10 <sup>-9</sup>
6	1.0 m <sup>3</sup> agua 1,000 kg arcilla 150 kg cemento 8.0 kg imper int		47.0		1.45	0.48	0.75	0.94				

### NOMENCLATURA

E<sub>50</sub> Módulo de elasticidad  
K Permeabilidad

Tabla1, Resultados de ensayos de laboratorio en lodo fraguante