

Suelo contaminado como relleno estructural en el nuevo puerto local de Stigsnaes

Fecha de entrega: 18 de Marzo 2009

Fecha de aceptación: 5 de Junio 2009

Rafael Aránguiz¹ y Helge Gravesen²

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, raranguiz@ucsc.cl

²Grontmij Carl Bro, Granskoven 8 DK-2600 Glostrup, Dinamarca, helge.gravesen@grontmij-carlbro.dk

En este trabajo se estudia la factibilidad de usar suelo contaminado como relleno estructural, además, se describen las variables que intervienen en el proceso y posteriormente se analizan los requisitos técnicos establecidos por la legislación danesa en el uso de suelo contaminado. Se realiza, también, un análisis de costo considerando dos tipos de muelles y el uso tanto de suelo contaminado como de arena limpia. Los resultados del análisis muestran que la alternativa más conveniente debe ser construida con doble muro de tablestaca y suelo contaminado como material de relleno. Además, se recomienda la ejecución de un estudio de impacto ambiental más completo con el fin de aplicar requisitos reducidos para el sistema de membrana según la legislación danesa.

Palabras clave: suelo contaminado, curvas de concentración, sistema de membranas

This paper analyzes the possibility of using contaminated soil as filling material. In addition, the important variables are described and subsequently, the technical requirements concerning contaminated soil in the Danish legislation are assessed. A cost analysis is carried out assuming two filling material, first clean sand and second polluted soil. In addition, two different sheet pile walls, namely, single and double wall, are included in the analysis. The results show that the best alternative considers a double sheet pile wall and polluted soil as infill. It is also recommended to carry out a complete environmental analysis in order to fulfil the 'reduced' requirement for the membrane system according to Danish legislation.

Keywords: polluted soil, concentration curves, membrane system

INTRODUCCIÓN

A partir del anuncio sobre el cierre definitivo de Refinerías Kuwait en Dinamarca en el año 1997, se dio comienzo a una serie de estudios destinados a desarrollar el parque industrial de Stigsnaes. Dos años más tarde, Maersk (1999) realizó un estudio de factibilidad para un nuevo terminal de contenedores localizado en Stigsnaes. Dicho estudio estimó que la región del Báltico experimentaría un fuerte incremento en el tráfico de contenedores. Por lo tanto, la construcción de un terminal de contenedores sería una posibilidad muy atractiva para el parque industrial. El estudio mostró, además, que el puerto de Stigsnaes estaría muy bien localizado geográficamente convirtiéndose en un puerto de entrada a la Región del Báltico.

La Figura 1 muestra que Stigsnaes está situado en el borde suroeste de la isla Zelandia, junto al canal Agersø frente a la isla del mismo nombre y frente a la isla

Ømø, las cuales separan el sector del canal Great Belt. Por lo tanto Stigsnaes, está localizado a solo 8 millas náuticas de la ruta internacional T.



Figura 1 : Localización de Stigsnaes. Reproducido del sitio www.krak.dk

Por otro lado, las dos islas localizadas en frente protegerían al puerto de la acción de las olas provenientes de las direcciones más frecuentes, y así, se evitaría la construcción de estructuras protectoras de alto costo. Además, la profundidad en el centro del

canal Agersø alcanza los 30 m, lo cual es favorable para la construcción de un puerto para embarcaciones de gran calado.

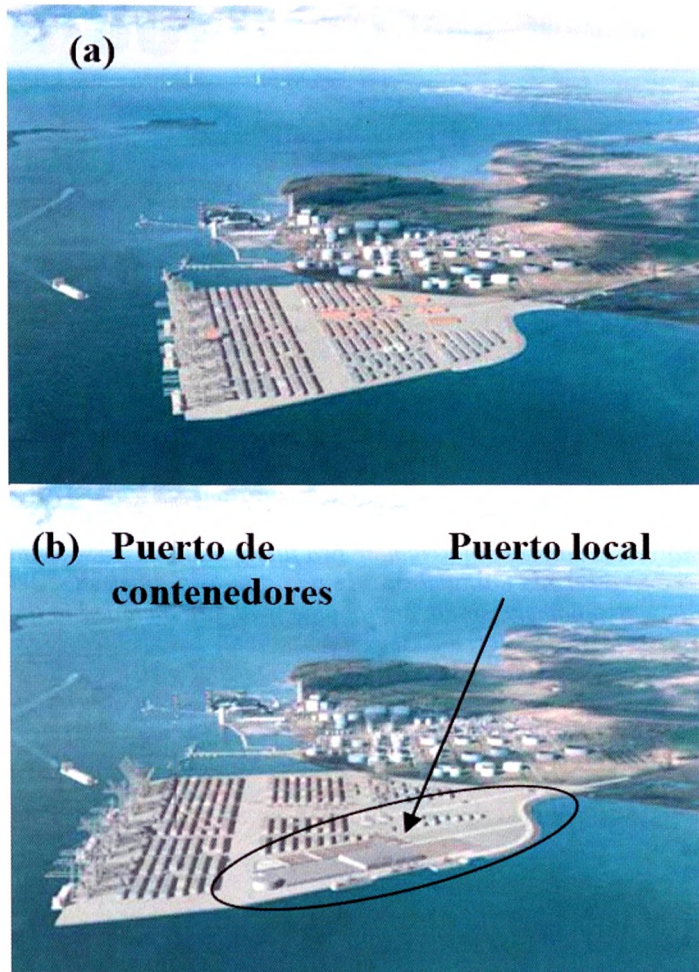


Figura 2 : Terminal de contenedores, (a) proyecto propuesto en 1999, (b) proyecto propuesto el 2004 que incluye puerto local (Grontmij *et al.*, 2004)

El primer estudio de impacto ambiental del año 1999 consideró un terminal de 80 hectáreas con 1200 m de muelle (Figura 2a). En el año 2004 se incluyó la participación de la empresa privada RGS-90, la cual realizó algunas modificaciones al proyecto original incluyendo un puerto local de 15 ha, esto es, una superficie total de 95 ha, y desplazaría el muelle 140 m hacia el canal Agersø, como se muestra en la Figura 2b.

Otra modificación importante fue el uso de material contaminado como material de relleno, con el fin de reducir costos y evitar la extracción de arena limpia.

Sin embargo, el proyecto Baltic Gate Terminal fue pospuesto debido al excesivo costo de construcción. De todos modos, el interés en un puerto local se

mantuvo, ya que contribuiría al desarrollo industrial y comercial de Stigsnaes.

El puerto local está pensado no solo para satisfacer las necesidades del parque industrial de Stigsnaes y de RGS-90 y su planta de tratamiento y reciclaje, sino también para albergar todas las actividades industriales que actualmente funcionan en el puerto de Korsør, ya que la autoridad comunal desea trasladar dichas actividades, las cuales podrían verse atrofiadas en su emplazamiento actual.

Los requerimientos técnicos se basan principalmente en las proyecciones en el tráfico del puerto de Korsør, 350 mil toneladas por año para el período 2006-2009. Del mismo modo, se estima que el tráfico de RGS-90 será de 350 mil toneladas por año en los próximos 10 años. Además, el parque industrial de Stigsnaes experimentaría un tráfico de 300 mil toneladas por año para el mismo período. La experiencia de los puertos daneses permite establecer que por cada 100.000 toneladas se necesitan 1.2 ha de puerto, incluyendo los muelles (Grontmij, 2004). Por lo tanto, el nuevo puerto local de Stigsnaes requeriría una superficie total de 12 ha. Además, la profundidad debería ser de a lo menos 8 m, ya que el calado máximo de los buques que operan en Korsør es 7.5 m.

USO DE SUELO CONTAMINADO

El uso de material contaminado en puertos se ha convertido en un tema de gran importancia desde el momento en que las autoridades ambientales comenzaron a discutir sobre los depósitos de material de dragado. En general, este material posee altas concentraciones de algunos componentes que lo clasifican como suelo contaminado. Lo cual genera la necesidad de contar con pautas para el manejo de dicho material con el fin de recomendar prácticas ambientalmente seguras.

En la década de los 80, tres grandes consultoras de ingeniería de Dinamarca trabajaron en la elaboración de un manual para describir las técnicas requeridas en depósitos de material de dragado y mejorar el conocimiento relacionado a esta materia. Con la ayuda de este manual, en las últimas décadas se han ejecutado varios proyectos que incluyen uso de suelo dragado. Por ejemplo, el dragado del puerto naval de Korsør requirió el depósito de 25.000 m³ de material. La solución en este caso consistió en depósitos detrás de muros tablestacados localizados en la línea de costa



(Gravesen *et al.*, 1992). El uso de esta técnica permitió, además, la ampliación del puerto de yates. Por lo tanto, el uso de suelo dragado en otro tipo de construcciones, no sólo soluciona el problema de depósito de suelo contaminado, sino también evita extracción y uso de suelo limpio.

En el año 2006, la municipalidad de Køge entregó la aprobación ambiental para la construcción de la ampliación del puerto de Køge. Este proyecto considera un total de 2,3 millones de metros cúbicos de suelo contaminado en una superficie de 40 ha, las cuales serían habilitadas como instalaciones portuarias (Roskilde Amt, 2006). La gran diferencia con el proyecto de Korsør, es el tipo de suelo utilizado, ya que éste provendría de sitios localizados en tierra firme y no sólo del dragado del puerto. Adicionalmente, la autoridad portuaria sacaría provecho económico al recibir material contaminado y así evitaría la compra de grandes cantidades de suelo limpio.

Esta nueva propuesta para el puerto local de Stigsnaes considera un puerto satélite de 12 ha de superficie, construido en dos etapas y ubicado a una profundidad promedio de 5 m, ver Figura 3. Esto hace que se requiera una gran cantidad de suelo de relleno, y por ende, se convierte en un proyecto de alto costo. Sin embargo, el uso de material contaminado en un ambiente cerrado, al igual que la ampliación del puerto de Køge, mantiene los contaminantes bajo control y disminuye el costo total.



Figura 3 : Alternativa para el nuevo puerto local de Stigsnaes

La alternativa estudiada en detalle requiere un volumen total de aproximadamente 1 millón de metros cúbicos, de los cuales 780 mil m³ serían depositados bajo el nivel del agua. Los muros perimetrales, los cuales consisten en diques y tablestacas, se construyen al inicio de las obras para delimitar la superficie del puerto y crear un recipiente cerrado, para luego rellenarlo con el suelo contaminado. El exceso de agua al interior del recipiente se descarga gradualmente al

mar y en forma controlada. Notar que como el relleno consiste en suelo contaminado, el exceso de agua estará igualmente contaminado. Además, la concentración de los contaminantes en el agua se incrementaría exponencialmente ya que el volumen de agua disminuye a medida que se ejecuta el relleno y la cantidad de contaminantes disueltos aumenta. Como el exceso de agua se descarga al mar, los niveles de concentración no deben exceder cierto nivel. Si esto ocurriera, la descarga debería ser detenida y el exceso de agua tratado antes de ser vaciado. Los niveles de concentración en el exceso de agua aumentan no solo por la disminución del volumen de agua, sino también por la infiltración de agua lluvia y la difusión del agua de poros, como se explica en los párrafos siguientes (Grontmij *et al.*, 2004) y en la Figura 4 :

- a) Descarga del suelo contaminado al interior del depósito. Algunos contaminantes son liberados cuando el suelo entra en contacto con el agua, y posteriormente el agua es desplazada debido a la presencia del suelo.
- b) Infiltración de agua lluvia. Existe una porción de suelo contaminado que no está en contacto con el agua, por lo tanto, el agua lluvia transportará dichos contaminantes hacia el agua de poros. Sin embargo, el agua lluvia también ayuda a disminuir la concentración de contaminantes ya que aporta con agua limpia.
- c) Difusión de agua de poros. Esto ocurre principalmente porque un fluido con un alto nivel de concentración tenderá a desplazarse hacia donde hay menor concentración. Otro fenómeno a considerar es la consolidación del suelo depositado.

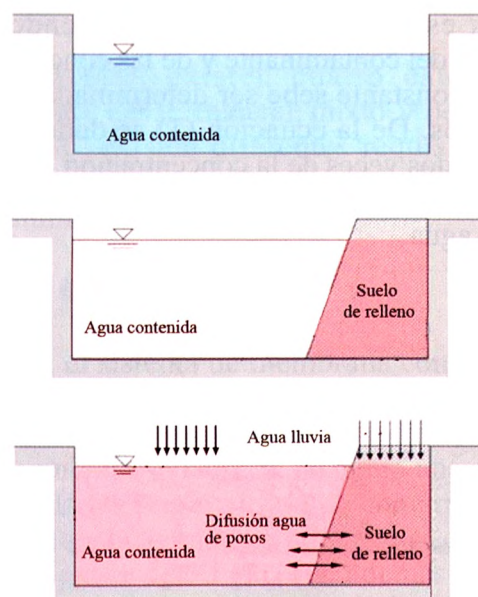


Figura 4: Fuentes contaminantes del exceso de agua

CURVAS DE CONCENTRACIÓN

Las curvas de concentración son una forma muy útil de controlar los niveles de concentración en el agua. Éstas predicen el comportamiento de los contaminantes en el agua en función del tiempo a medida que el relleno se ejecuta y el exceso de agua se elimina.

Para la construcción de las curvas de concentración, las tres fuentes de contaminación identificadas en la sección anterior deben ser cuantificadas mediante ensayos para todos los contaminantes, es decir, existen tantas curvas de concentración como contaminantes en el suelo.

La Figura 5 muestra una curva de concentración típica para un componente con tres niveles de concentración distintos en el suelo de relleno, tal que $c_1 > c_2 > c_3$. Además, la cantidad de contaminante es la misma en los tres casos. Se puede ver en la Figura 5 que a mayor concentración en el suelo, mayor es la concentración final en el agua para un mismo período de tiempo. Si se estableciera una concentración admisible en el agua, se podría ver por consiguiente que a menor concentración en el suelo, mayor el tiempo necesario para alcanzar el nivel admisible en el agua c_a .

La concentración final en el agua c_w tiene una relación lineal con la concentración del contaminante en el suelo c_s (Rasmussen y Rasmussen, 2005) y está dada por la expresión:

$$c_w = c_s K_D \quad (1)$$

donde K_D es una constante que depende de las propiedades del contaminante y de las condiciones del agua. Esta constante debe ser determinada en base a experimentos. De la ecuación (1) se deduce que un aumento en dos veces de la concentración en el suelo, significará un aumento del doble en la concentración final en el agua.

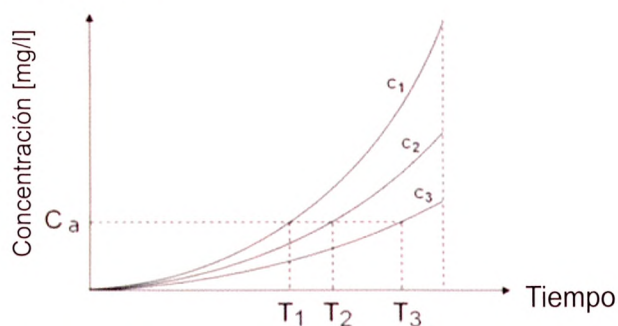


Figura 5 : Curva de concentración para un contaminante con tres concentraciones diferentes

Por otro lado, la concentración admisible c_a corresponde a una fracción de la concentración crítica c_c dada por:

$$c_a = k c_c \quad (2)$$

en la cual $k < 1$ y c_c se define como 10 veces el límite de calidad del agua, el cual es definido generalmente en la legislación y depende de las condiciones físicas presentes. Valores típicos de concentraciones límites, críticas y admisibles se muestran en la Tabla 3.

La Figura 6 muestra algunos procedimientos de control de la concentración en el exceso de agua cuando el tiempo necesario para ejecutar el relleno es mayor al tiempo para alcanzar la concentración admisible. Un procedimiento considera el depósito de material contaminado durante todo el periodo T_f , pero cuando el nivel de concentración alcanza el valor c_a , el exceso de agua es tratado antes de ser descargado al mar, como se indica en la Figura 6a. De esta manera, el nivel de concentración en el agua se mantiene constante o podría incluso disminuir. Alternativamente, el material contaminado podría ser depositado durante un periodo T_i , tal que $T_i < T_a$. De esta forma, la máxima concentración en el exceso de agua será menor que la admisible, a pesar que la concentración continuaría aumentando debido a la difusión del agua de poros, y así se evita el tratamiento del exceso de agua, como muestra la línea roja en la Figura 6a.

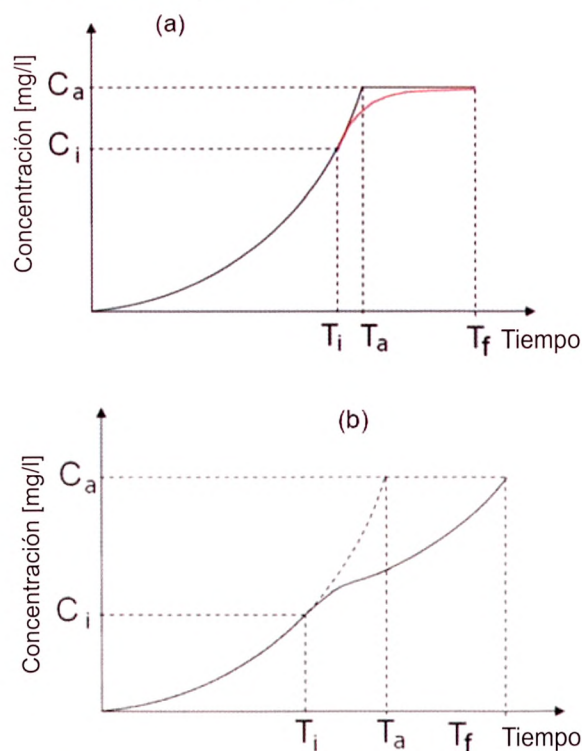


Figura 6 : Alternativas para controlar la concentración de contaminantes en el agua libre



Es importante recalcar que las curvas de concentración se construyen para cada contaminante en el suelo. Por lo tanto, si un contaminante alcanza su nivel admisible en el agua, es posible utilizar suelo contaminado con otro componente o con un menor nivel de concentración, tal como se muestra en la Figura 6b. En este caso, el suelo con más alto nivel de concentración se deposita durante un período de tiempo T_p , tras el cual se utiliza suelo con menor concentración.

En los casos descritos previamente, la determinación del tiempo T_i es muy importante si se quiere evitar un procedimiento de tratamiento de agua.

En conclusión, existe más de una forma de realizar un relleno utilizando material contaminado, tal que los niveles de concentración en el exceso de agua se mantengan bajo los admisibles. El método seleccionado dependerá de la información disponible tanto de los componentes como de los niveles de concentración en el suelo y de las curvas de concentración en el exceso de agua.

LEGISLACIÓN PARA USO DE SUELO CONTAMINADO

En Dinamarca no existe una ley para uso de material contaminado en ambientes marinos, como es el presente caso. Los requerimientos se basan en la ley para rellenos ejecutados en tierra firme. Para el caso de rellenos en tierra firme, la legislación danesa distingue dos tipos de suelos cuando se utiliza material contaminado: suelo para depósito y suelo para reutilización. Por lo tanto, existen leyes y requerimientos diferentes para la emisión y construcción con suelo de depósito y de reutilización (BEK, 2000).

Sin embargo, debido a la dificultad que un suelo sea clasificado como de reutilización, ya que requiere un tratamiento previo, la ley danesa asume que el suelo es de depósito y por lo tanto, los requerimientos son más estrictos en este caso. A continuación se describen algunas características y requisitos para este tipo de suelo.

Requisitos para suelo de depósito como material de relleno

El decreto 650 de junio del 2000 (BEK, 2000) establece que los materiales de relleno deben ser desechos mixtos, incluyendo suelo contaminado y sedimentos tanto

marinos como terrestres. No se permite el uso de material clasificado como “requiere tratamiento”, como por ejemplo, suelos contaminados con gasolina. Como ejemplo, la Tabla 1 muestra algunos contaminantes típicos permitidos y sus concentraciones máximas en suelos de depósito.

Tabla 1 : Concentraciones para dos clases de suelo según la ley danesa (BEK, 2000)

Componente	Clase 2 [mg/kg]	Clase 3 [mg/kg]
As	20	50
Cd	1	5
Cr	500	750
Cu	500	750
Hg	1	5
Ni	40	100
Pb	120	400
Zn	500	1500

Requisitos para el sistema de membrana

Los requisitos mínimos para el sistema de membrana también están dados en el decreto 650. De acuerdo a este documento, existen tres tipos de requisitos: completo, reducido y extra reducido. La autoridad regional es la encargada de decidir el tipo de requisito que aplica en cada caso.

Para realizar aquello, es necesario contar con un estudio de impacto ambiental, el cual debe considerar el daño potencial del suelo en el agua de poros y exceso de agua. En caso de no contar con un estudio, se aplica el requisito completo por defecto.

Adicionalmente, existen cuatro categorías de contaminantes: inerte, mineral, mixto y peligroso. Por consiguiente, existen diferentes requisitos para el sistema de membrana, dependiendo de la categoría de los contaminantes.

Requisito completo

En general, el sistema de membrana consiste en una membrana primaria, que es un sello artificial e impermeable y una membrana secundaria, que puede ser una membrana geológica, tal como una arcilla con permeabilidades según el tipo de contaminante (ver Tabla 2). Sobre la membrana primaria, se debe instalar un dren de grava de 50 cm, que además sirve como protección para la membrana inferior, tal como se muestra en la Figura 7.

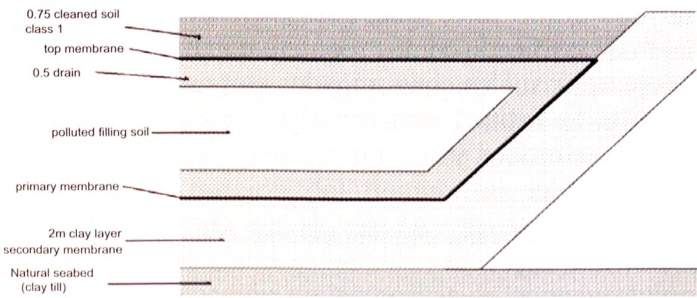


Figura 7 : Sistema de membrana para requisito completo establecido en el decreto 650

El decreto 650 establece además, que si el suelo natural consiste en arcilla que cumple los requisitos de permeabilidad, es posible utilizar el suelo natural como membrana secundaria.

Requisito reducido

El requisito reducido se aplica cuando el estudio de impacto ambiental demuestra que el proyecto no presenta un riesgo para el entorno. En este caso, no se requiere una membrana primaria cuando se utilizan contaminantes inertes y el dren de grava puede ser reducido a 30 cm. Finalmente, la membrana secundaria debe satisfacer los requisitos de permeabilidad k indicados en la Tabla 2.

Requisito extra reducido

En este caso no existen recomendaciones para el control y construcción con material contaminado. Sin embargo, la autoridad regional es quien decide en esta materia y establece las especificaciones técnicas. Lo mismo ocurre para el caso de suelo de reutilización.

Tabla 2 : Requisitos mínimos para la membrana secundaria según la categoría del contaminante (BEK, 2000)

Requisito Propiedad	Completo		Reducido	
	k m/s	espesor m	k m/s	espesor m
Inerte	10^{-7}	2	-	-
Mineral	10^{-9}	2	10^{-8}	1
Mixto	10^{-9}	2	10^{-8}	1
Peligroso	10^{-9}	5	10^{-8}	2

Requisitos para el agua de poros

El nivel de concentración del agua de poros es altamente dependiente del nivel de concentración del suelo depositado. Por lo tanto, el agua de poros que potencialmente puede infiltrar a través del sistema de membrana debe cumplir ciertos requisitos. Como

sistema de control se instalan drenes en la parte interior y exterior del sistema de membrana, al igual que en el área donde se deposita el suelo contaminado, con el fin de monitorear los niveles de concentración.

Como ejemplo, la Tabla 3 muestra valores típicos de concentraciones máximas en el agua de poros. Dichos valores fueron establecidos para el proyecto de ampliación del puerto de Køge (Roskilde Amt, 2006).

Requisitos para el exceso de agua

El exceso de agua se genera a medida que se ejecuta el relleno con suelo contaminado. Adicionalmente, agua lluvia e infiltración desde áreas vecinas también incrementan el exceso de agua, la que finalmente debe ser descargada al mar.

Al igual que el agua de poros, el nivel de concentración aumenta a medida que se avanza en la ejecución del relleno, por lo tanto, el sistema de control debe monitorear constantemente los niveles de concentración antes de realizar la descarga al mar.

Los niveles admisibles de concentración están descritos en la Tabla 3. En este caso, los valores son calculados utilizando una constante $K = 0.2$ en la ecuación (2). El exceso de agua que sobrepasa las concentraciones admisibles no debe ser descargado al mar directamente sino que debe ser tratado previamente.

Tabla 3: Niveles límite, crítico y admisible de concentración para el exceso de agua y agua de poros (Roskilde Amt, 2006)

Componente	límite calidad c_i ($\mu\text{g/l}$)	valor crítico c_c ($\mu\text{g/l}$)	valor admisible c_a ($\mu\text{g/l}$)
As	4	40	8
Cd	2,5	25	5
Cr	1	10	2
Cu	1,6	15	3,2
Hg	0,3	3	0,6
Ni	8,3	83	16,6
Pb	5,6	56	11,2
Zn	86	860	172

SISTEMA DE MEMBRANA PARA EL PUERTO DE STIGSNAES

De acuerdo a los informes de Mecánica de Suelos entregados por la empresa GEUS, el fondo marino consiste en una delgada capa de fango sobre una capa gruesa de arcilla glacial. Sin embargo, la capa de fango es prácticamente inexistente hasta una profundidad del



mar de 5 m, posteriormente se incrementa hasta un espesor de 0,6 m a una profundidad del mar de 19 m. Por lo tanto, se estima que en el frente del muelle, el cual está ubicado a una profundidad de 10 m, el espesor de la capa de fango es de aproximadamente 0,3 m. Como el fango es una mezcla de sólidos y un alto contenido de agua, conteniendo también material orgánico, se cree conveniente remover esta capa de suelo. Por lo tanto, el sistema de membrana se instalaría directamente sobre la capa de arcilla natural. Los ensayos mostraron además que la capa de arcilla glacial posee una permeabilidad que varía entre 10^{-7} a 10^{-6} m/s, lo cual puede ser comparado con los valores dados en la Tabla 2 y concluir lo siguiente: si se aplica el requisito completo, la capa natural de arcilla podría ser utilizada como membrana secundaria sólo para suelo con contaminantes inertes. Para otro tipo de contaminantes, la membrana secundaria se debe construir con una capa adicional de arcilla, tal como se indica en la Tabla 2. Sin embargo, debido a la profundidad del agua de 2.5 m a un extremo del puerto, no sería factible la construcción de una membrana de 2 m de espesor, ya que el volumen disponible para material contaminado se reduciría enormemente. Si los requisitos reducido o extra reducido son aplicables, el espesor de la membrana secundaria puede ser reducido a 1 m o simplemente eliminada. Para ello, la autoridad regional decide el tipo de requisito a aplicar en base al estudio de impacto ambiental.

La membrana primaria consiste, en general, en una membrana plástica y una membrana compuesta de geotextiles con bentonita de sodio. Esta última genera una membrana sólida y espesa al entrar en contacto con el agua. Sin embargo, debido a las propiedades de la bentonita, se recomienda que la construcción con este tipo de material se realice en ambientes totalmente secos. Es por ello que en el caso del puerto local de Stigsnaes, la solución debe considerar una membrana que sea factible de instalar bajo el agua. La membrana Bentofix BFG 5000 cumple los requisitos y ha sido recomendada por el fabricante para instalaciones bajo agua. Esta membrana posee una permeabilidad k de $2 \cdot 10^{-11}$ m/s y un espesor de 7 mm.

ESTUDIO DE UN CASO

En los párrafos siguientes se describe un ejemplo de cálculo de curvas de concentración, el cual se basa en simulaciones numéricas realizadas por el Instituto de hidráulica Danés DHI. Dichas simulaciones se realizaron para el proyecto Baltic Gate Terminal y

considera un volumen de relleno de 450.000 m³ al año. El material contaminado corresponde a una mezcla de residuos de incineración y ceniza volante, en una proporción de 2/3 y 1/3, respectivamente. Dinamarca ha generado energía a partir de la incineración de desechos por más de un siglo. La incineración es una tecnología de tratamiento de los desechos que involucra la combustión de material y/o sustancias orgánicas. En el año 2005, el 4.8% de la electricidad total y el 13.7% de la calefacción doméstica en Dinamarca fueron generados mediante tecnologías de incineración. Por otro lado, la ceniza volante tiene buenas propiedades ingenieriles. A diferencia de otros suelos para relleno, la ceniza tiene un alto coeficiente de uniformidad. Las concentraciones de algunos componentes que están presentes en ambos materiales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 : Concentración de los componentes presentes en residuos de incineración y cenizas volante (Grontmij *et al.*, 2004)

Componente	Concentración (mg/kg)	
	Residuos	Cenizas
As	21,2	96
Cd	2,31	1,2
Cr	289,5	175
Cu	2560	165
Hg	0,051	1,33
Ni	93,5	165
Pb	2095	150
Zn	3115	350

De la misma forma, la Tabla 5 muestra las concentraciones de los mismos componentes en el exceso de agua al final del proceso constructivo, es decir, cuando el relleno se ha ejecutado en su totalidad, el cual ha sido estimado en 8 años. La tercera columna de la Tabla 5 presenta un índice de concentración que se define como el cociente entre la concentración en el exceso de agua y la concentración admisible. Se puede observar que sólo tres componentes poseen una concentración bajo la admisible, cadmio, níquel y zinc; mientras que todos los demás exceden dicho valor y cromo es el que experimenta el mayor índice.

Tabla 5 : Concentración total en el exceso de agua y cociente entre concentración y valor admisible

Componente	Concentración exceso de agua mg/kg	Índice de Concentración
As	240	30
Cd	0,66	0,132
Cr	11600	5800
Cu	1430	447
Hg	0,68	1,13
Ni	15	0,9
Pb	14	1,25
Zn	84	0,49

En la Tabla 4 se puede observar, además, que la concentración inicial de cobre en el residuo de incineración es aproximadamente 9 veces más alta que la de cromo. Mientras que en la Tabla 5 se observa que ocurre lo contrario en el exceso de agua, en la cual el cromo posee una concentración 8 veces más alta que la de cobre. Es importante destacar además que si bien el zinc tiene una de las concentraciones más altas en el suelo de relleno, el exceso de agua muestra el cociente de concentración más bajo de todos los componentes.

Si se asume que la solución es una base, la liberación de metales será menor que para el caso de una solución ácida, tal como se observa para cobre, plomo y zinc. Sin embargo, es importante mencionar que el plomo, zinc y cromo son metales anfotéricos, lo cual significa que reaccionan tanto en una base como en un ácido. La gran diferencia está en que el mínimo de solubilidad para el cromo ocurre para un pH = 7,5, después de lo cual, la solubilidad se incrementa en función del pH. Similar comportamiento experimentan el Pb y Zn para un pH = 10. Por consiguiente, una solución con un pH cercano a 10 resultará en una baja solubilidad para el cobre, zinc y plomo, mientras que el cromo experimentará todo lo contrario, como es el presente caso.

La variación de la solubilidad en función del pH, es una de las principales razones de por qué se recomienda tener un alto nivel de agua, lo cual es favorable para mantener condiciones anaeróbicas con alto pH y bajo contenido de oxígeno. De esta manera, la liberación de contaminantes se reduce y sería necesario tratar el agua sólo para algunos componentes. Finalmente, la Figura 8 muestra las curvas de concentración para el cromo y plomo en el exceso de agua. Se puede observar que el cromo excede los niveles admisibles desde el principio del período de relleno, mientras que el plomo alcanza su valor admisible sólo al final del período. Por lo tanto, si el material de relleno consistiera en una mezcla de residuo de incineración y cenizas volantes, el exceso de agua debería ser tratado para disminuir los niveles de cromo durante todo el período de construcción, antes de descargar el exceso de agua al mar. Por su parte, los niveles de concentración de plomo podrían ser controlados utilizando un mayor porcentaje de ceniza de carbón en el suelo de relleno durante la última etapa de construcción, ya que la concentración de este contaminante es mucho menor que en el residuo de incineración.

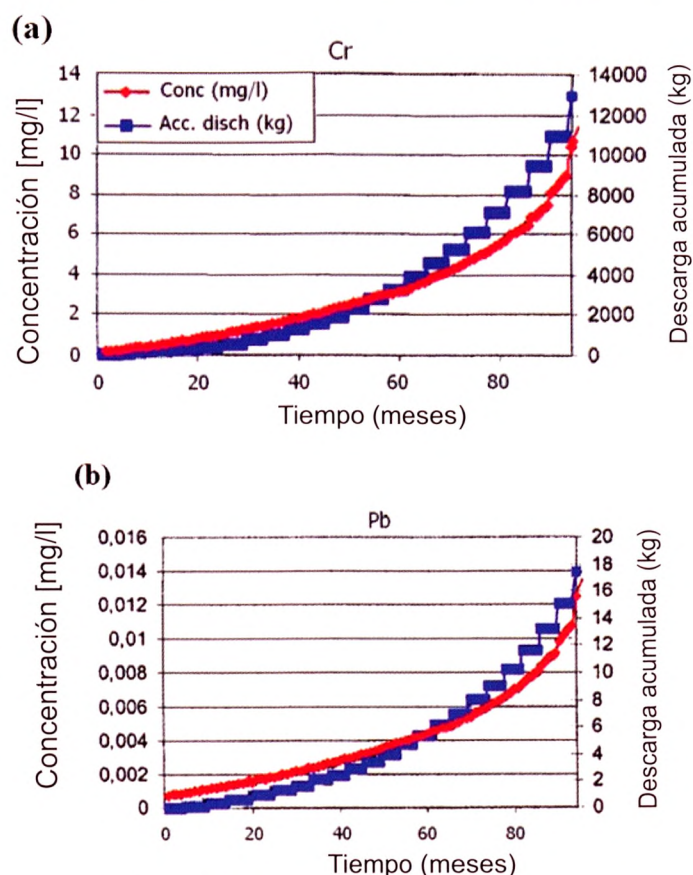


Figura 8: Curvas de concentración (a) cromo y (b) plomo (Grontmij *et al.*, 2004)

ANÁLISIS DE COSTO

El análisis de costo se realiza considerando dos etapas de construcción (E1 y E2) y dos configuraciones para los muelles de tablestaca, esto es, muros doble y muro simple con placa de anclaje. Adicionalmente, el análisis considera dos tipos de suelo de relleno, los cuales consisten en arena limpia y suelo contaminado, como se muestra en la Tabla 6. Para el análisis se consideraron precios estándares, los cuales fueron recopilados de proyectos previos de similares características en Grontmij/Carl Bro S/A. Posteriormente, el valor final se incrementó en un 8% por concepto de instalaciones.

El precio por recibir material contaminado es aproximadamente U\$10/ton, el cual incluye manipulación y procedimientos de control. Se considera, además, un costo fijo de U\$340.000/ton por instalaciones para almacenamiento. En general, se observa que el mayor costo se obtiene para el puerto con muro doble y arena limpia. Esto es obvio ya que el costo del muro doble es mayor al muro simple. Sin embargo, la misma configuración de muro con suelo contaminado posee el menor costo total, y



no así el muro simple. Esto se debe a que el aumento en el costo por el muro doble es compensado por el aumento en el volumen disponible para suelo contaminado y por ende, aumentan los ingresos por concepto de recepción de material contaminado.

Tabla 6 : Análisis de costo, en millones de U\$, para dos tipos de muelles y dos clases de suelo

Tipo suelo	Muro	E1	E2	Total+8%
Arena Limpia	Simple	12	10	22
	Doble	13	11	24
Suelo contaminado	Simple	9	5	14
	Doble	8	4	12

Finalmente, a pesar del costo de almacenamiento, tratamiento previo y control, el uso de material contaminado presenta una alternativa más económica para la ejecución de los rellenos estructurales.

CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que para el caso de requerimiento completo para el sistema de membrana, no es posible utilizar el fondo marino presente en Stigsnaes como membrana secundaria, a menos que se utilice sólo material con contaminantes inertes. Además, el uso de una capa extra de arcilla de 2 m de espesor como membrana secundaria, disminuiría de manera considerable el volumen disponible para material contaminado. Por lo tanto, es necesario un estudio de impacto ambiental más completo para ver si se pueden reducir los requisitos, con el fin de evitar el uso de membrana primaria y requerimientos demasiado estrictos para la secundaria.

Si los niveles de concentración de los contaminantes en el suelo de relleno son conocidos, es posible controlar las concentraciones en el exceso de agua. Además, mediante las curvas de concentración, es posible definir el método adecuado tanto para ejecutar el relleno como para tratar el exceso de agua.

Si bien, el uso de material contaminado disminuye el costo total del proyecto para el caso de muro doble en un 50% aproximadamente, este tipo de material es recomendable no solo por el beneficio económico, sino también porque resuelve el problema de dónde depositar suelo contaminado y segundo, evita el uso de recursos naturales limpios.

REFERENCIAS

- BEK n° 650 (2000). Resolución sobre localización de depósitos de residuos de fecha 29/06/2000 (en danés)
- Gravesen H., Jensen E. D. and Grevy P. D. (1992). Deposition of contaminated dredged material from selected Danish harbours. *10th International Harbour Conference*, Antwerp, Belgium
- Grontmij|Carl Bro A/S (2004). Puerto local de Stigsnaes, identificación de necesidades para el nuevo puerto en el parque industrial de Stigsnaes (informe en danés).
- Grontmij|Carl Bro A/S, GEUS y DHI (2004). Resumen del estudio de impacto ambiental del proyecto de terminal internacional de contenedores y localización del puerto local en Stigsnaes (informe en danés).
- Maersk Broker KS (1999). Baltic Gate Terminal, forecast of container traffic and economic feasibility.
- Rasmussen D. and Rasmussen E.K. (2005). Evaluación ambiental para el área de depósito en el puerto de Esbjerg. Instituto de Hidráulica Danés DHI (informe en danés).
- Roskilde Amt (2006). Aprobación comunal y ambiental de Køge para el proyecto de depósitos de suelos (informe en danés).

VALENZUELA Y ORTIZ INGENIERIA LTDA.

- Asesoría y Desarrollo de Proyectos Estructurales ■
- Revisión Estructural, Inscripción 1ª categoría ■
- Proyectos a lo Largo de Todo el País ■
- Atención Personalizada ■



Rosario Sur 91 OF. 205 Fono: 2127274 - 3428738 - Fax: 2201592
Email: valenzuelaortiz@tie.cl - ingesingenieria@tie.cl - inges@ctcinternet.cl