

Variación de la capacidad portante de suelos granulares contaminados con hidrocarburos

Fernández Serrano, Roberto¹
CEDEX - UPM

Martínez Santamaría, J. Manuel
CEDEX – UPM

Rogel Quesada, J. Manuel
GEOCISA – UPM

Tema:

RESUMEN

Un evento contaminante de un suelo por vertido accidental de un hidrocarburo, además de representar, fundamentalmente, una amenaza ambiental, supone la introducción de un líquido inmiscible con agua en el terreno. Dicha fase líquida, no acuosa, produce, en el suelo granular ensayado, una variación de sus parámetros resistentes que puede traducirse en una disminución de su capacidad portante, circunscrita al volumen de la masa del suelo realmente contaminada conocido como pluma contaminante. Se presenta, en este texto, el resultado de los ensayos realizados con una arena de Miga de Madrid contaminada con hidrocarburos en diferentes grados, así como las implicaciones resistentes del comportamiento observado.

Suelo contaminados, propiedades geotécnicas, capacidad portante, arena de miga, hidrocarburos.

1 INTRODUCCIÓN

Según datos del actual Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, en julio de 2008, se habían inventariado 4.532 emplazamientos como potencialmente contaminados en España. Los hidrocarburos representan uno de los contaminantes de suelos más frecuentes. Por otra parte, de acuerdo con el API (*American Petroleum Institute*), el establecimiento de la normativa ambiental y una mejora en las técnicas de transporte y almacenamiento de hidrocarburos desarrollado en las últimas cuatro décadas, ha permitido reducir en, aproximadamente, un 70% el volumen de vertidos de hidrocarburos. Según

esta misma fuente de información, actualmente, la industria productiva de hidrocarburos y de refinera con un 5% y un 6%, respectivamente, del volumen total de vertidos accidentales apenas resulta significativa frente al 49% y 40% del volumen total de vertidos, en este caso, producidos durante el transporte y almacenamiento/consumo de hidrocarburos, respectivamente. En este sentido, será más probable que un vertido incontrolado de hidrocarburos se produzca vinculado a las actividades de transporte y almacenamiento, como actividades vinculadas a la ingeniería civil.

Independientemente de los condicionantes ambientales de un evento de vertido accidental de un hidrocarburo en un terreno granular, dife-

¹ Roberto.Fernandez@cedex.es

Laboratorio Geotecnia del CEDEX
C/Alfonso XII, 3 y 5. 28014 Madrid

rentes estudios han concluido, que, la presencia de líquidos de fase no acuosa ligeros (menos densos que el agua), generalmente crudos de petróleo y distintas fracciones de la destilación del crudo empleadas como los combustibles habituales (gasolinas, querosenos, gasóleos, etc.) producen una variación de las propiedades geotécnicas del suelo contaminado. Los ensayos realizados, de forma aislada en laboratorio, con muestras remoldeadas y mezcladas de forma homogénea con algún hidrocarburo ligero común, con distintos tipos de suelos, muestran, de forma general, una disminución de la resistencia al corte (Meegoda y Ratnaweera, 1994; Puri et al. 1994; Al Sanad et al., 1995) acompañada de una variación en la plasticidad de la fracción fina (Srivastava y Pandey, 1998; Olgun y Yildiz, 2010; Jia et al., 2011).

La realización de nuevos ensayos geotécnicos con muestras remoldeadas con un suelo representativo como la Arena de Miga de Madrid (Escario, 1985; Rodríguez Ortiz, 2000) confirma la tendencia observada por anteriores autores y permite la formulación de un criterio empírico sencillo para computar la variación del ángulo de rozamiento interno del suelo ensayado en función del contenido de hidrocarburo empleado, en el caso aquí presentado: Gas-oil comercial.

2 VARIACIÓN DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

El análisis de los datos obtenidos de una campaña de ensayos geotécnicos, realizados con una Arena de Miga contaminada con hidrocarburos en distintos grados ha permitido observar una disminución generalizada del valor del ángulo de rozamiento interno efectivo, en base a la ejecución de dos series de ensayos de corte directo con muestra de suelo remoldeada, previamente mezclada con un contenido de hidrocarburo planificado en una serie creciente de 0% (material no contaminado), 0,5%, 2%, 5% y 7% sobre peso seco de suelo; en concreto, una serie para una muestra densamente compactada, con una densidad relativa mayor de 70%, y por otra parte una serie adicional para una muestra “floja”, con una densidad relativa menor del 35%. La preparación

de la muestra se ha realizado mediante muestras contaminadas, en los distintos grados mencionados, con idéntica energía de compactación, lo que implica un cierto error no cuantificado. Dicho error depende de la diferente densidad relativa alcanzada por una y otra muestras compactadas con idéntica energía volumétrica, aunque con diferente contenido en hidrocarburo, apreciación deducida tras el análisis de los datos de ensayos de compactación del suelo contaminado. Dicho error no ha sido contemplado, en ningún caso, por autores precedentes aunque el procedimiento de preparación de la muestra incluía la compactación de la misma.

2.1 Compactación del suelo contaminado

Los ensayos de compactación realizados con Arena de Miga contaminada en los mismos grados que para la serie de ensayos de resistencia, es decir, 0% (material no contaminado), 0,5%, 2%, 5% y 7% sobre peso seco de suelo, permiten observar una variación de la densidad seca máxima, alcanzada para cada grado de contaminación.

Si bien es cierto que existe literatura en cuanto a la variación de los parámetros de compactación (densidad seca – humedad óptima), de suelos granulares contaminados con hidrocarburos (Al Sanad et al., 1995; Puri, 2000; Khamchhiyan et al., 2006), no se ha relacionado dicha variación con la realización de ensayos de resistencia con muestras previamente mezcladas con el contenido de contaminante deseado, remoldeadas y compactadas.

El error aproximado, a tener en cuenta en el estudio de la variación del ángulo de rozamiento interno, es causado, en parte, por la previa compactación de la muestra y puede estimarse en base al contenido de contaminante sobre peso seco (grado de contaminación) y en base a la energía de compactación por unidad de volumen. De manera, que, para mayor energía de compactación (muestras más densas) el error cometido será menor que para muestras más flojas. Por ejemplo, en el caso concreto de las condiciones de Proctor Normal, se observa una tendencia creciente del valor de la densidad seca máxima de la Arena de Miga, hasta alcanzar un rango máximo de entre el 2% y el 5% y posteriormente una

disminución de dicho valor de densidad seca máxima. Para ilustrar el fenómeno, se presentan los valores obtenidos, sobre una curva (Figura 1) de % de contaminación – Densidad seca máxima. Para contenidos de hasta 70.000 ppm. se puede afirmar que el líquido contaminante sustituye parcialmente al agua en los valores de humedad óptima.

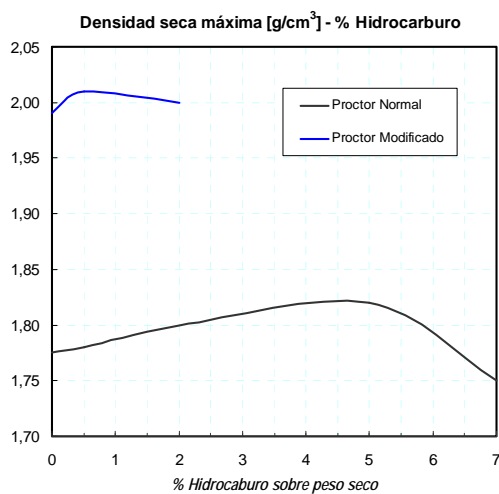


Figura 1. Curva de densidad seca máxima, en condiciones de PN y PM, en función del grado de contaminación.

La figura 1 muestra que la “efectividad” de la compactación, entendida en términos de densidad seca, mejora inicialmente para valores crecientes de contaminación por hidrocarburos alcanzando un valor máximo en dicha mejoría. Alcanzado un determinado valor de densidad seca máxima, en función de un contenido en contaminante “óptimo”, se invierte la tendencia, mostrando un comportamiento similar al de un ensayo de compactación. Nótese, que los valores de humedad correspondiente a dichos ensayos variaban en torno al 11 % del cociente entre peso de líquido (agua + hidrocarburo) y peso del sólido.

La magnitud del error cometido en un ensayo con suelos contaminados, que implique la previa compactación de la muestra remoldeada, dependerá, por tanto, del contenido de hidrocarburo y depende de la energía por unidad de volumen aplicada.

2.2 Ángulo de rozamiento interno

Considerando la variación de la cohesión como no representativa, para el caso de la Arena de Miga, la variación de la resistencia de este material se ha estudiado a partir de la variación del ángulo de rozamiento interno, en función del grado de contaminación. La variación obtenida de este parámetro se ha representado en la figura 2, en la que se puede observar que para dos muestras preparadas con: (1) densidad relativa densa y (2) densidad relativa “floja”, esta evoluciona de forma diferente y sin embargo su respectivo ajuste lineal de los datos es similar.

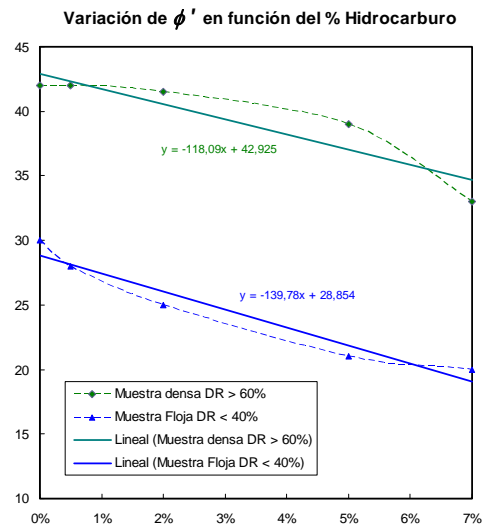


Figura 2. Variación del ángulo de rozamiento interno de una arena de miga en función del grado de contaminación con gas-oil comercial.

Del análisis de la figura 2, se deduce que existe una disminución generalizada del ángulo de rozamiento interno, estudiando dos densidades relativas diferentes. Asumiendo, como se ha comentado anteriormente, que debe existir un error relacionado con el comportamiento de la muestra contaminada, con distintos contenidos, para idéntica energía de compactación aplicada en la preparación de la muestra, resulta razonable estudiar la variación del ángulo de rozamiento, teniendo en cuenta el valor inicial, es decir, sin contami-

nar, de los dos casos “extremos” representados en la figura 2.

Por otra parte, dado que la densidad relativa del suelo granular depende de la profundidad máxima a la que se ha encontrado, desde un punto de vista geológico, este parámetro resulta ser una variable en el estudio de la capacidad portante de los suelos contaminados, que debe igualmente considerarse en su análisis.

Con el objeto de simplificar la estimación de la capacidad portante de un suelo, del que se conoce su ángulo de rozamiento interno “natural” (muestra no contaminada), se puede asumir que los ajustes lineales realizados en la figura 2 son una aproximación válida de la evolución del ángulo de rozamiento interno, teniendo en cuenta la incertidumbre relativa a la preparación de las muestras de ensayos por compactación y la influencia de la variación de las propiedades físico-químicas del contaminante, que, sin duda, suponen la alteración a medio y largo plazo de las propiedades geotécnicas de los suelos contaminados. En esta línea, Al Sanad et al. (1996) y Aiban (1998) concluyen que en el caso de estudio a medio y largo plazo de las propiedades geotécnicas de suelos contaminados con hidrocarburos se puede estimar una cierta “recuperación” de las propiedades geotécnicas del suelo contaminado, lo cual concuerda con una disminución del grado de contaminación, puesto que ciertas fracciones de compuesto se volatilizan, otras fracciones son solubles, pudiendo pasar al agua, y otras fracciones son degradables, dando lugar a elementos físico-químicamente más estables.

2.3 PLASTICIDAD

Con objeto de verificar el comportamiento observado, tanto en compactación, como en variación del ángulo de rozamiento, para muestras contaminadas con Gas-oil comercial, se realizaron Límites de Atterberg para la fracción fina de la Arena de Miga, que en el caso estudiado representaba una media de un 22% de finos ($\# < 0,08$ UNE).

La variación de los límites, que se realizaron mezclando la muestra de suelo seco con la cantidad deseada de contaminante añadida al agua, se ha recogido en una Carta de Casagrande (Fig. 3)

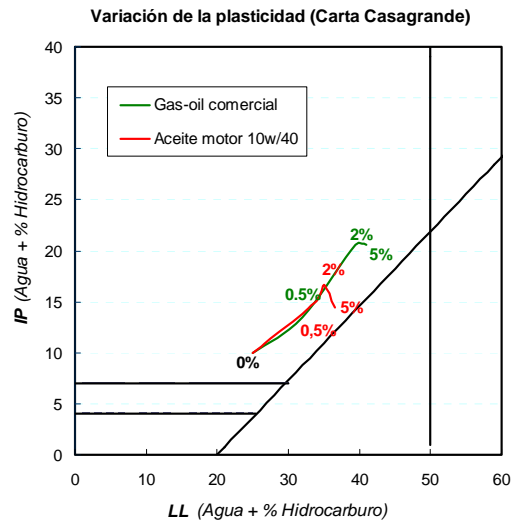


Figura 3. Variación de la plasticidad de una arena de miga en función del grado de contaminación con gas-oil comercial (verde) y aceite lubricante de motor (rojo).

La figura 3 muestra que el aumento de la plasticidad para el caso de que el contaminante sea Gas-oil es más acusada que en el caso del aceite de motor, posiblemente por causa de que ambos hidrocarburos ligeros, presentan viscosidades diferentes.

Puesto que la adición de hidrocarburos aumenta el Índice de Plasticidad del suelo, en este caso, se ha observado que dicho aumento se produce hasta alcanzar un máximo comprendido entre un contenido de 2 y 5% sobre peso seco de contaminante, en ambos casos. Este hecho podría justificar un comportamiento similar de otros hidrocarburos diferentes a los empleados y por tanto, verificar el comportamiento resistente observado para el caso de Gas-oil, como representativo de los suelos contaminados con hidrocarburos ligeros, asumiendo que la variación será más atenuada ó más amplificada, dependiendo, muy probablemente, de la viscosidad del líquido añadido.

3 VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE

Con el objeto de proporcionar un orden de magnitud aproximado para el estudio de la reducción de la capacidad portante de un suelo, para el caso de cimentaciones superficiales se puede considerar que existe contaminación homogénea del terreno, es decir una masa de suelo continua bajo cimentación superficial con el mismo grado de contaminación. Dado que la literatura es escasa y todos los anteriores autores consideran un criterio de resistencia de Mohr-Coulomb, se ha seguido la misma línea de estudio. Existen tantos interrogantes (influencia de la compactación en la preparación de la muestra, de la viscosidad del hidrocarburo empleado, de la evolución del hidrocarburo según la naturaleza del suelo, de la influencia del contenido de finos, etc.) que, el problema se ha abordado siguiendo criterios geotécnicos muy básicos.

Shin y Das (2001) indican que la capacidad portante de un suelo contaminado, en el que se realiza una cimentación superficial mediante un ensayo a escala, presenta una disminución drástica de su valor de carga de hundimiento (estado límite último), dado un suelo contaminado de forma homogénea. De forma simplificada, el empleo de expresiones de tipo analítico para el cálculo de la carga de hundimiento de una cimentación superficial aislada, debe considerar el suelo homogéneamente contaminado, con el objeto de introducir un valor único del ángulo de rozamiento interno, en las distintas expresiones de los factores de capacidad carga N_q , N_c y N_γ (deducibles a partir del primero), existentes en la literatura y en la normativa y recomendaciones técnicas.

Tomando, entonces, el caso de un supuesto suelo granular con una cohesión despreciable (del tipo arena de Miga), se representa en la figura 4, la variación de los valores de N_q para un caso de un suelo sin contaminar, frente a un suelo contaminado, empleando para ello la expresión:

$$N_q = e^{\pi g \phi'} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (1)$$

donde, ϕ' es el ángulo de rozamiento interno efectivo, en grados, del suelo sin contaminar, y N_q es el factor de capacidad de carga.

Del análisis del comportamiento observado en la figura 2 puede deducirse una expresión empírica, válida para arenas de carácter silíceo contaminadas con Gas-oil, con un contenido en finos menor del 25 %.

$$N_{qC} = e^{\pi g [\phi' - 130 \cdot F_{DR} \cdot H]} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{[\phi' - 130 \cdot F_{DR} \cdot H]}{2} \right) \quad (2)$$

Expresión, en este caso, válida para arenas contaminadas con hidrocarburos con un máximo de 70.000 ppm, donde, H es el %₁ (tanto por uno) de hidrocarburo sobre peso seco de una muestra del suelo contaminado y F_{DR} es un factor, denominado, de densidad relativa para el que se han estimado unos valores, en función de su densidad relativa (DR), de:

$F_{DR} = 1,00$ para $40 < DR < 60$

$F_{DR} = 1,08$ para $DR < 40$, arena floja.

$F_{DR} = 0,92$ para $DR > 60$, arena compacta.

La expresión 2, permitiría, por tanto, estimar de forma aproximativa, directamente, un factor de capacidad de carga disminuido en función del grado de contaminación, N_{qC} , para arenas contaminadas con menos de un 25 % de finos ($\# < 0,08$ UNE), dentro de un rango amplio de ángulo de rozamiento interno efectivo, para el suelo sin contaminar, de entre 30 y 42°.

La validez de la expresión debe ser entendida en el caso de un vertido reciente, dado que la presencia de contaminantes de carácter orgánico en el suelo supone distintos tipos de fenómenos físico-químicos, que implican la volatilidad, solubilidad en agua y degradación de distintas fracciones del hidrocarburo y por tanto una amortiguación del fenómeno observado, entendiendo amortiguación como la disminución de menor entidad del valor de N_{qC} que el obtenido mediante la expresión empírica aquí propuesta.

Se proponen a continuación 3 ábacos para la obtención de N_q y N_{qC} en función de las expresiones 1 y 2.

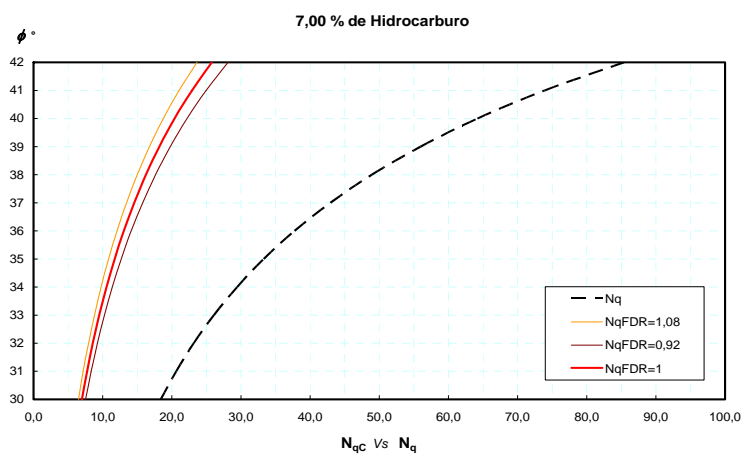
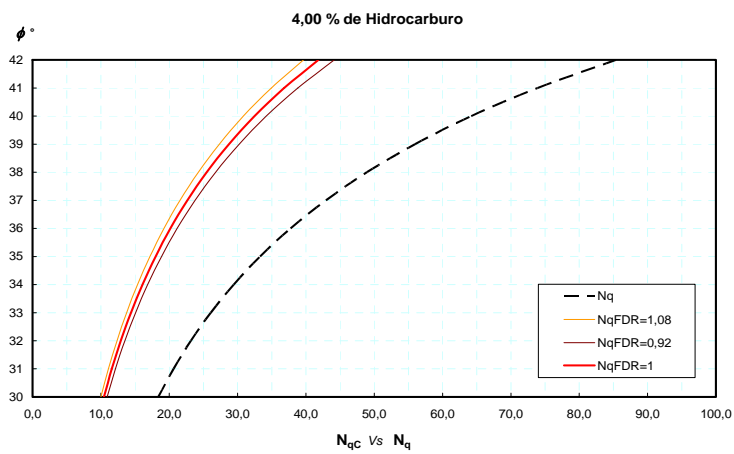
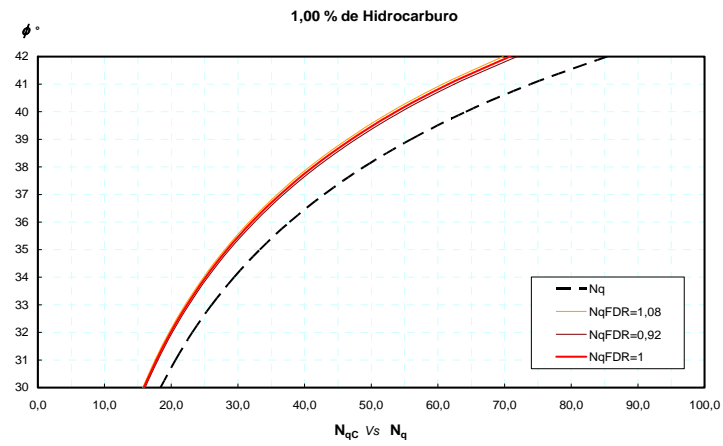


Figura 4. Variación del factor de carga N_q , expresado como N_{qc} para el caso de una arena silicea contaminada con hidrocarburo ligero en un 1%, 4% y 7 % sobre peso de suelo seco, y, en función de la densidad relativa del suelo granular.

Esta sencilla aproximación muestra que la capacidad portante del suelo disminuye, en función del grado de contaminación del suelo.

3.1 Distribución real del contaminante

En realidad, la anterior expresión es conservadora en un supuesto estudio de la capacidad portante de un suelo contaminado real, puesto que, como se sabe, la contaminación no se distribuye de forma homogénea en un suelo granular. La mayoría de los contaminantes se introducen en el terreno por percolación, a través de los suelos, en el caso de un vertido accidental.

En el caso concreto de los hidrocarburos, existe una fracción, denominada por el acrónimo BTEX (Benzeno, Tolueno, Etileno y Xilenos), que comprende compuestos solubles que pueden transportarse disueltos en el agua procedente de una precipitación atmosférica, percolarse y moverse hasta entrar en contacto con el nivel freático, más concretamente con una franja capilar de saturación. Una vez que el contaminante entra en contacto con el agua, los contaminantes estarán sujetos a fenómenos de advección, dispersión y difusión.

El volumen principal de contaminante del hidrocarburo ligero (en este caso) ó pluma de contaminante se distribuye fundamentalmente sobre la franja de saturación correspondiente al nivel freático, deprimiendo esta por el propio peso del contaminante y formando complejos estados de saturación de agua y corpúsculos de contaminante inmisible en agua compartiendo poros. La masa de contaminante puede ser continua ó discontinua y su caracterización es más compleja, aún teniendo en cuenta el efecto de la carrera estacional ó temporal del nivel freático.

En base a lo anterior, se puede recurrir a modelos numéricos de carácter hidrogeológico ó a modelos físicos, para caracterizar eventos contaminantes particulares. En este sentido, cabe mencionar el modelo físico de transporte de líquidos de fase no acuosa ligeros (Fernández Serrano, et al., 2011) desarrollado dentro del ámbito del presente trabajo, con el fin de justificar que la variación de las propiedades geotécnicas de un suelo contaminado debe ceñirse únicamente a la masa de suelo realmente contaminada.

Por consiguiente, es recomendable emplear la expresión propuesta en este texto con carácter orientativo y, en todo caso, realizar una adecuada caracterización del suelo contaminado, en su caso, con el objetivo de realizar una estimación de la geometría y el grado de saturación parcial de contaminante. Y, una vez realizado un modelo geométrico, asignar a los volúmenes de la pluma el parámetro geotécnico correspondiente afectado de su variación en función del grado de contaminación.

4 CONCLUSIONES

Se propone una expresión para la estimación preliminar de la disminución de la capacidad portante de arenas silíceas, en función de su grado de contaminación por hidrocarburos y en el caso de vertidos incontrolados.

El estudio de la variación de la capacidad portante de suelos contaminados con hidrocarburos, mediante ensayos de laboratorio, depende de la efectividad de la compactación previa de las muestras remoldeadas.

AGRADECIMIENTOS

A Alfonso Gorrochategui y Jorge Gorrochategui del Laboratorio de Geotecnia de la EUITOP de la UPM por la ayuda prestada y a Carlos Delgado Alonso-Martirena por su colaboración.

REFERENCIAS

- Aiban, S.A. (1998). The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands. The Long-term Environmental Effects of the Gulf War. *Environment International*, Vol. 24 - 1-2, pp. 153-161.
- Al-Sanad, H.A., Eid, W.K. e Ismael, F. (1995). Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121 - 5, pp. 407-412.
- Al-Sanad, H.A., Eid, W.K. e Ismael, F. (1996). Closure to Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122 - 9: pp. 787-788.

Escario, V. (1985). Síntesis geotécnica de los suelos de Madrid y su alfoz. Centro de Publicaciones M. Fomento. Madrid.

Fernández, Serrano, R., Iskander, M. y Tabe, K. (2011). 3D contaminant flow imaging in transparent granular porous media. *Geotechnique Letters*, Vol. 1, pp. 71–78.

Jia, Y.G., Wu, Q., Yang, Z.N. y Shan, H.X. (2011). The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River Delta, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 69. pp. 349-357.

Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. y Tajik, M. (2006). The effects of crude contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran. IAEG-2006, comunicación 214. The Geological Society of London.

Meegoda, N.J. y Ratnaweera, P. (1994). Compressibility of contaminated fine grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 17, pp. 101-112.

Olgun, M. y Yildiza, M. (2010). Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil. *Applied Clay Science*, Vol. 48 - 4, pp. 615-621.

Puri, V.K., Das, B.M., Cook, E.E., y Shin, E.C. (1994). Geotechnical properties of crude contaminated sand. Analysis of soils contaminated with petroleum constituents. Ed. Tracey A. O'Shay, Keith B. Hoddinott - por ASTM, pp. 75-88.

Puri, V.K. (2000). Geotechnical Aspects of Oil-Contaminated Sands. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, Vol. 9, pp. 359 – 374.

Rodríguez Ortiz, J.M. (2000). Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid. R.O.P. Extraordinario diciembre, N 3405, pp. 59-84.

Shin, E.C. y Das, B.M. (2001). Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand. *International Journal of Offshore Polar Engineering*, Vol 11, pp. 220-227.

Srivastava, R.K. y Pandey, V.D. (1998). Geotechnical evaluation of oil contaminated soil. Contaminated and derelict land. Ed. R.W. Sarsby, pp. 204-210.