

Variación de la resistencia al corte con la temperatura

Empirical analysis of skin friction under variations of temperature

Adrián Rogelio de la Parra Álvarez^{1*} y María de Groot Viana²

Palabras clave

corte directo;
temperatura;
geotermia;
suelo-hormigón;

Sumario

En la caracterización geotécnica de los suelos, los parámetros resistentes, cohesión (c) y ángulo de rozamiento (Φ), han sido medidos tradicionalmente sin tener en cuenta la posible influencia que en ellos puede tener la temperatura. Este aspecto puede llegar a ser de vital importancia en el diseño de cimentaciones termoactivas.

En el presente trabajo se analiza la variación de estos parámetros, en la interfaz suelo-hormigón con la variación de temperatura. Para este análisis se han realizado una serie de ensayos de corte directo suelo-hormigón, modificando la temperatura de las muestras. Se comparan los resultados obtenidos para materiales cohesivos y granulares.

Keywords

shear strength case;
temperature;
geothermal;
soil-concrete;

Abstract

In soil geotechnical characterization, strength parameters, cohesion (c) and internal friction angle (Φ) have been traditionally measured without taking into account temperature, been a very important issue in energy geostructures.

The present document analyzes the variation of these parameters in soil-concrete interface at different temperatures. A traditional shear strength case with a forced plane of failure was used. Several tests were carried out to determine the variation of skin friction in granular and cohesive soils with temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Los pilotes termoactivos o geotérmicos son elementos de cimentación que cumplen con una doble funcionalidad: en primer lugar, como elementos estructurales, transmitiendo las cargas del edificio al terreno; en segundo lugar, como elementos termoactivos, intercambiando calor con el suelo circundante. El aprovechamiento de la energía geotérmica somera en un edificio o estructura se basa en la mayor eficiencia energética del intercambio de calor con el terreno, en vez de con el aire, por su mayor estabilidad térmica frente a oscilaciones estacionales y por su capacidad de almacenamiento de calor. Se consigue la calefacción del edificio en la estación fría y su refrigeración en el verano a través del intercambio de calor con el terreno, con la ayuda de una bomba de calor, con un considerable ahorro energético. El intercambio de calor con el terreno se puede realizar mediante sondeos geotérmicos en los cuales se introducen conducciones por las que circula un líquido caloportador. Sin embargo, los pilotes y elementos de cimentación se pueden también utilizar como intercambiadores de calor con el terreno, si se les dota de estas conducciones. Esta tecnología, aunque novedosa en España, cuenta con una cierta trayectoria en países europeos como Austria (Brandl, 2006), Suiza (Laloui et al., 2006; Laloui, 2008, 2011) o Inglaterra (Bourne-Webb et al., 2009, 2012). Según Laloui (2008), de los 1110 GWh de energía geotérmica producidos en Suiza en el año 2003, un 1,2 %, (13

GWh) fueron extraídos del terreno mediante cimentaciones termoactivas.

Las variaciones cíclicas de temperatura pueden afectar al comportamiento geotécnico del terreno que rodea el pilote. Las oscilaciones térmicas del pilote ocasionadas por su explotación como elemento termoactivo son cíclicas, con periodicidades diarias, mensuales y anuales. La temperatura se convierte así en una sollicitación de tipo dinámico que puede afectar al comportamiento a largo plazo del sistema suelo-estructura.

Resulta necesario realizar un diseño apropiado que tenga en cuenta todos los factores mencionados y garantice la integridad y durabilidad de la estructura. Analizar como varían los parámetros resistentes del suelo, c y ϕ , ante oscilaciones térmicas es necesario para asegurar que los cambios en la resistencia por fuste no son significativos al activar térmicamente el pilote. Se han realizado diversos ensayos de corte entre diversas muestras de suelo y hormigón a diferentes temperaturas para evaluar la variación de los parámetros c y ϕ .

Durante el 2011 el Laboratorio de Geotecnia inició un proyecto de desarrollo experimental denominado "PI-TERM: "Caracterización termomecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termoactivos", financiado con ayuda del subprograma INNPACTO, en su convocatoria de 2011. En el proyecto se ha estudiado el comportamiento termomecánico de un pilote prefabricado preparado para funcionar como elemento termoactivo, debidamente instrumentado. Se diseñó un ensayo a escala real, con un pilote prefabricado de sección cuadrada de 350x350 mm, el cual dispone de un hueco central cilíndrico de 122 mm de diámetro, donde se colocan las tuberías de polietileno para

* Corresponding author: adrirogeica@gmail.com

¹ Ingeniero de C. C. y P. León, España.

² Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, España.

la transferencia de calor con el terreno. El pilote, de 17,40 m de longitud total, está compuesto por 2 tramos de 8,70 m, unidos mediante una junta especialmente diseñada. El pilote se ha hincado en un local habilitado para tal fin en terrenos de la Universidad Politécnica de Valencia. Atraviesa un perfil litológico constituido fundamentalmente por depósitos deltaicos blandos y trabaja principalmente por punta.

Para analizar el comportamiento que puede tener el pilote con la temperatura en la interfaz hormigón-suelo se han realizado diversos ensayos de corte con temperatura usando como material hormigón, de propiedades similares a las del propio pilote, y distintas muestras de suelo. El objetivo de estos ensayos ha sido comprobar la influencia que puede tener la temperatura en los parámetros resistentes, cohesión (c) y ángulo de rozamiento (Φ), en la interfaz hormigón-suelo.

2. MATERIALES EMPLEADOS

En los ensayos de corte se han empleado como materiales: hormigón, arena de Hostun y arcilla obtenida del sondeo realizado en Valencia, emplazamiento del pilote geotérmico.

2.1. Hormigón

El hormigón empleado es un mortero de características similares al empleado en el pilote termoactivo del proyecto PITERM.

Para realizar la muestra de hormigón se utilizó como molde la caja de corte empleando un desencofrante para facilitar el desmolde de la muestra. Las dimensiones de la pastilla de hormigón son 10x10x2 cm. La dosificación con la que se realizó la muestra de se observa en la tabla 1. A continuación se muestra la pastilla de hormigón empleada en los ensayos (figura 1).

Las características del hormigón son las siguientes:

Tabla 1. Dosificaciones empleadas en el pilote y la muestra de hormigón

HA-50/L/20	Dosificación Pilote (kg/m ³)	Dosificación utilizada (kg/m ³)
Cemento	395	395
Gravas	1101	1101
Arena	843	843
Agua	144	194,4
Aditivo	7,9	-
Agua/cemento	0,36	0,49

Se ha analizado la rugosidad de la muestra ya que los resultados de los parámetros resistentes serán, en gran medida, función de la rugosidad de la superficie de hormigón.

Los parámetros utilizados para definir la rugosidad son la media aritmética o promedia de la altura de línea central (R_a) que se define como la media aritmética de los valores absolutos de las diferencias de las crestas y fondos del perfil a la línea media, tomadas a lo largo de una longitud básica.



Figura 1. Pastilla de hormigón empleada en los ensayos.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad [1]$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad [2]$$

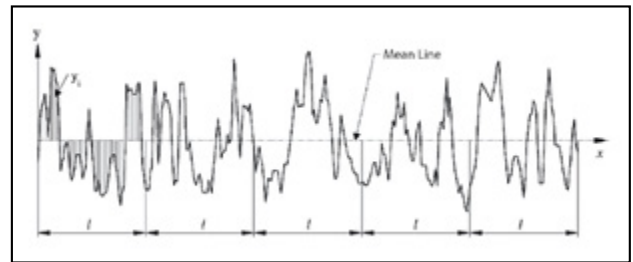


Figura 2. Definición de R_a (Fuente: Gadelmawla et al., 2002).

El otro parámetro utilizado es la altura de diez puntos (R_z) y se define por la ISO Internacional 1302:2002 como la diferencia en altura entre la media de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos a lo largo de la longitud de evaluación del perfil (Ecuación 3). La figura 3 muestra la definición del parámetro de la altura (R_z) de diez puntos.

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad [3]$$

Donde n es el número de muestras a lo largo de la evaluación longitud.

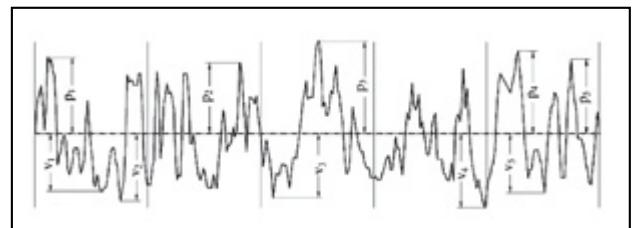


Figura 3. Definición de $R_z(ISO)$ (Fuente: Gadelmawla et al., 2002).

Para la obtención de dichos parámetros se ha empleado un equipo portátil, Traceit®, desarrollado por la empresa alemana INNOWEP GmbH que tiene el Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias (CSIC-UCM) con

el cual se analizan 21 puntos de la muestra de hormigón tomadas en la superficie de la pastilla de hormigón.

A continuación se muestran los resultados de R_a y R_z de los 21 puntos aleatorios analizados en la superficie de la pastilla de hormigón, donde X e Y son dos direcciones perpendiculares entre sí.

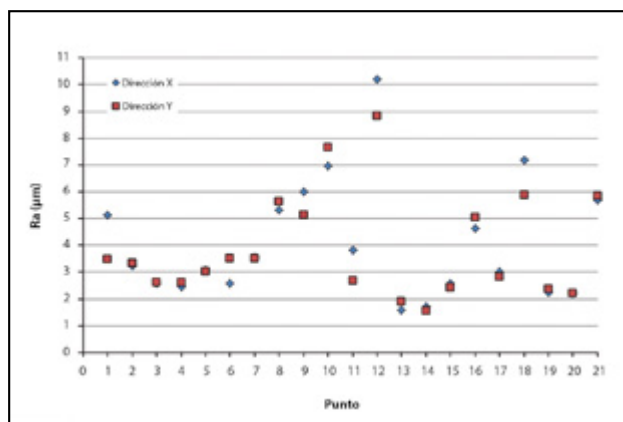


Figura 4. Rugosidad analizada en la superficie de la pastilla de hormigón a través del parámetro R_a .

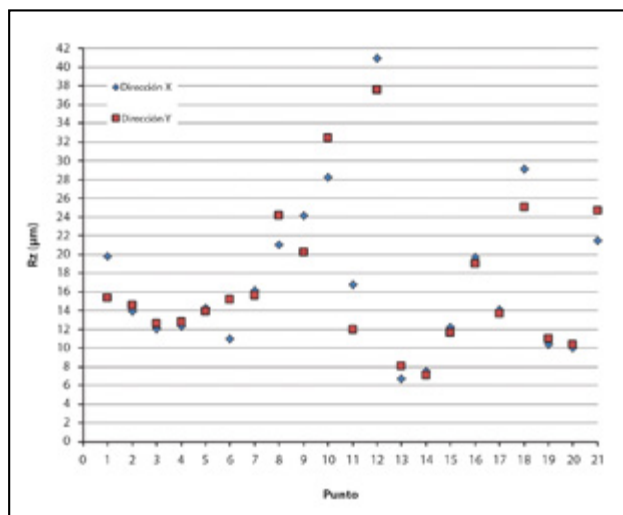


Figura 5. Rugosidad analizada en la superficie de la pastilla de hormigón a través del parámetro R_z .

Resumen de los resultados de la rugosidad superficial de la muestra de hormigón:

Tabla 2. Resumen de los resultados de la rugosidad superficial

Dirección	X		Y		Media	
Parámetro	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
Valor medio	4,08	17,23	3,90	16,99	3,99	17,11

Según la norma ISO-EN UNE 1302:2002 los valores obtenidos de R_a en ambas direcciones clasificarían la superficie como N8 en una escala donde N1 es de calidad excelente o lisa y N12 es de calidad pobre, muy irregular o rugosa, por lo que se puede considerar que la muestra empleada en el ensayo es rugosa.

2.2. Suelo arcilloso

La muestra inalterada de arcilla (figura 6) procede del sondeo realizado en Valencia.



Figura 6. Testigo de la muestra de suelo obtenida del sondeo para el trabajo.

Dicha muestra se encuentra a una profundidad entre 24,80 m y 25,40 m; a partir de ella se tomaron:

- Muestras inalteradas circulares de 6 cm de diámetro y 2,5 cm de altura
- Se realizaron muestras remoldeadas con este material de 10x10x2,5 cm. En la tabla 3 se muestran las propiedades de la arcilla empleada en los ensayos.

Tabla 3. Propiedades de la arcilla

Densidad seca (t / m^3)	1,63
Humedad (%)	27
Límite líquido (%)	22
Límite plástico (%)	17
Índice de plasticidad (%)	5 (NP)
Clasificación (S.U.C.S.)	CL - ML
Fracción fina, (0,08 mm) (% pasa)	85

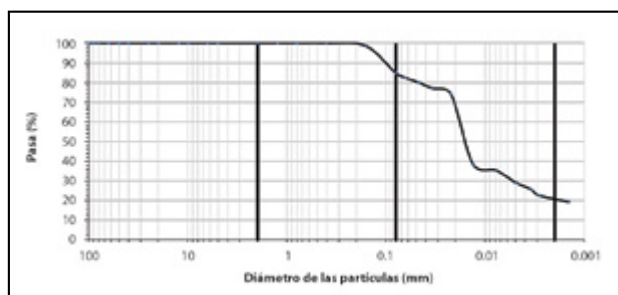


Figura 7. Curva granulométrica de la muestra de arcilla.

2.3. Arena

Se realizaron ensayos con Arena de Hostun RF. Para su identificación se han realizado varios ensayos granulométricos por tamizado, cuyo resultado medio puede verse en la figura 8. El análisis de dicha figura indica que, desde un punto de vista granulométrico, la arena de Hostun RF puede clasificarse como una arena uniforme de tamaño medio, pues el diámetro de sus granos está comprendido entre 0,65 y 0,16 mm, el diámetro medio (D_{50}) es de unos 0,35 mm y el coeficiente de uniformidad ($C_u = D_{60}/D_{10}$) es de 1,8.

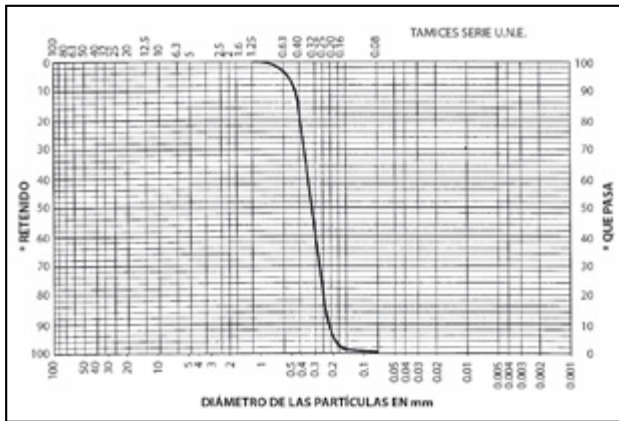


Figura 8. Curva granulométrica de la arena de Hostun.

Por otra parte, las densidades máxima y mínima obtenidas en laboratorio han sido, respectivamente, de 15,68 kN/m³ y 12,65 kN/m³. Dado que el peso específico de las partículas sólidas es de 25,97 kN/m³, los correspondientes índices de poro mínimo y máximo son, respectivamente, 0,656 y 1,05. Todos estos valores están en consonancia con los datos publicados de Flavigny et al (1990) .La densidad empleada en la muestras es de 14 kN/m³ y una densidad relativa de 49,5 %.

3. PROCEDIMIENTO

A continuación se detallan todos los elementos con los que se realizó el ensayo.

3.1. Caja de Corte

Para determinar los parámetros de resistencia del suelo: ángulo de rozamiento (Φ) y cohesión (c) se utilizaron las cajas de corte cuadradas de 10x10 cm para las muestras remoldeadas y la caja circular de diámetro 6 cm para la muestra inalterada.

Los elementos empleados en el ensayo han sido:

- Dos termopares, uno embebido en el hormigón y el otro en el agua de la caja de corte para controlar la temperatura de ambos elementos y del aparato de corte
- Un termómetro digital para medir la temperatura de cada uno de los termopares colocados
- Una resistencia para de calentar la muestra de 10W
- Un generador de corriente, de 12V, al cual está conectado la resistencia para generar el calor (Figura 9)



Figura 9. Resistencia, generador, termómetro y termopar empleados para la realización del ensayo térmico.

3.2. Ensayos de corte suelo-suelo

Se realizó un ensayo tipo consolidado no drenado (CU), para la arcilla, y consolidado drenado (CD) para la arena con tres tensiones normales: 50-150 y 300 kPa en ambos casos. La velocidad a la que se realizaron los ensayos fue de 0,008 mm/min para la arcilla y de 0,026 mm/min para la arena.

3.3. Ensayos de corte hormigón- suelo

En este tipo de ensayo, la pastilla de hormigón se dispuso en la parte inferior de la caja de corte, mientras que en la parte superior el material de suelo a ensayar.

Todos se realizaron a temperatura ambiente y con la misma densidad seca y humedad inicial de la muestra.

3.4. Ensayos de corte hormigón-suelo a distinta temperatura

Para poder comparar la variación de las tensiones tangenciales con la temperatura, se realizaron ensayos de corte a unos 40°C para observar si al variar la temperatura los parámetros de la interfaz hormigón-suelo variaban.

Para poder alcanzar la temperatura deseada en la muestra de suelo y hormigón la temperatura se elevó a través de la resistencia que se situó dentro de la caja de corte (figura 10), en la parte inferior de la pastilla de hormigón.

El control de la temperatura se realizó mediante dos termopares. Uno colocado en el interior de la muestra de hormigón y otro en el agua de la caja de corte.



Figura 10. Resistencia empleada dispuesta en la caja de corte.



Figura 11. Cavity realizada en la pastilla de hormigón para la introducción del termopar.

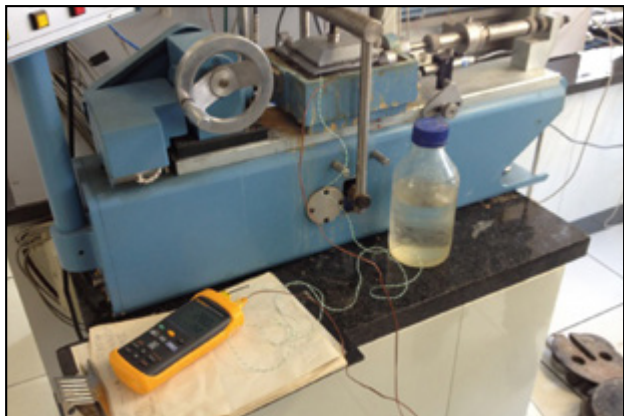


Figura 12. Dispositivos empleados en el ensayo de corte térmico.

Para introducir el termopar en la muestra de hormigón se realizó una cavidad lateral (figura 11). Se solventó el problema de la evaporación de agua en la caja de corte a través de un sistema de goteo continuo. En la figura 12 se observa el montaje del ensayo en la caja de corte.

Una vez dispuesta toda la instrumentación se realizó el calentamiento de la muestra hasta alcanzar la temperatura deseada y se dejó consolidar para posteriormente realizar el ensayo.

3.5. Resumen de los ensayos realizados

A continuación se muestra un resumen de los ensayos realizados para este estudio (tabla 4).

4. RESULTADOS

A continuación se presentan las curvas de rotura obtenidas en los ensayos de corte realizados con las distintas muestras de suelo, arcilla y arena.

4.1. Suelo arcilloso

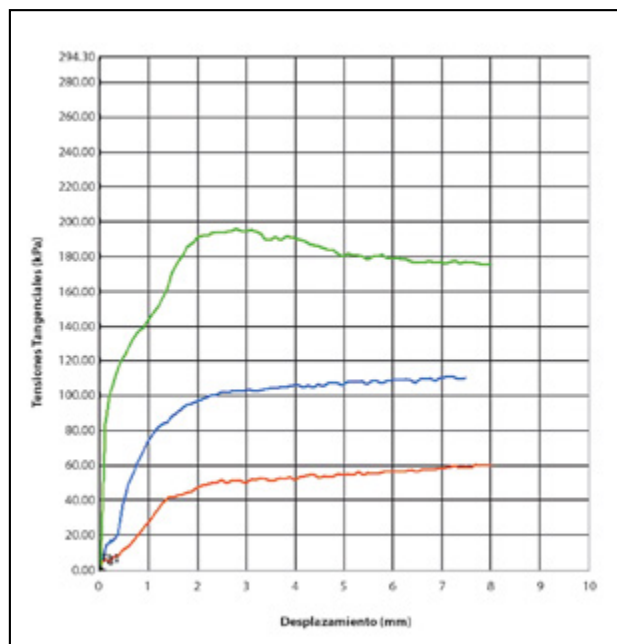


Figura 13. Curva de rotura del ensayo de corte arcilla-arcilla inalterada.

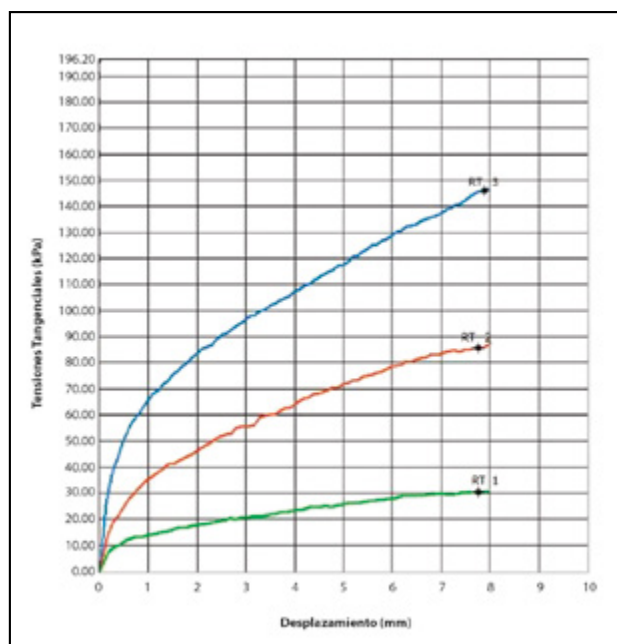


Figura 14. Curva de rotura del ensayo de corte arcilla-arcilla remodelada.

Tabla 4. Resumen de los ensayos realizados

Material	Tipo de ensayo	Tipo de muestra	Tamaño de la muestra	σ_v^* (kPa)	Temp. (°C)
Arcilla - Arcilla	CU	Circular Inalterada	$\varnothing = 6 \text{ cm}$ $h = 2,5 \text{ cm}$	50 – 150 – 300	21
Arcilla - Arcilla	CU	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	21
Arcilla - Hormigón	CU	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	21
Arcilla - Hormigón	CU	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	40
Arena - Arena	CD	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	21
Arena - Hormigón	CD	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	21
Arena - Hormigón	CD	Cuadrada Remoldeada	10 x 10 x 2,5 cm	50 – 150 – 300	41

Nota: σ_v^* es la tensión normal aplicada

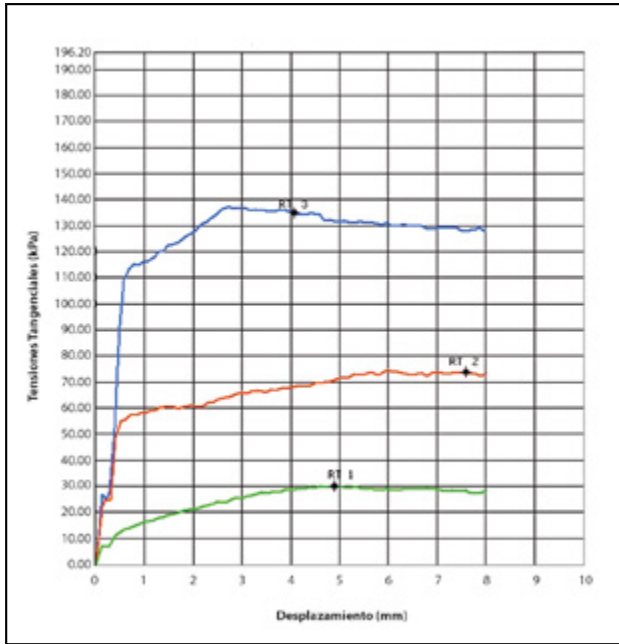


Figura 15. Curva de rotura del ensayo de corte hormigón-arcilla a temperatura ambiente.

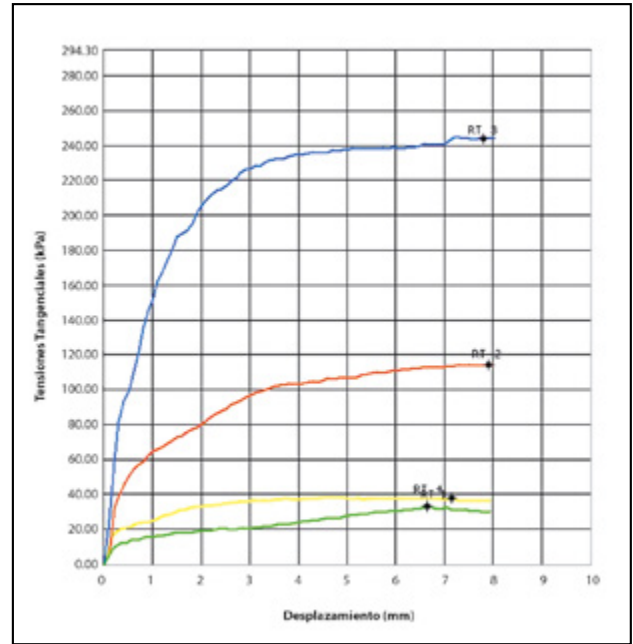


Figura 17. Curva de rotura del ensayo de corte arena-arena.

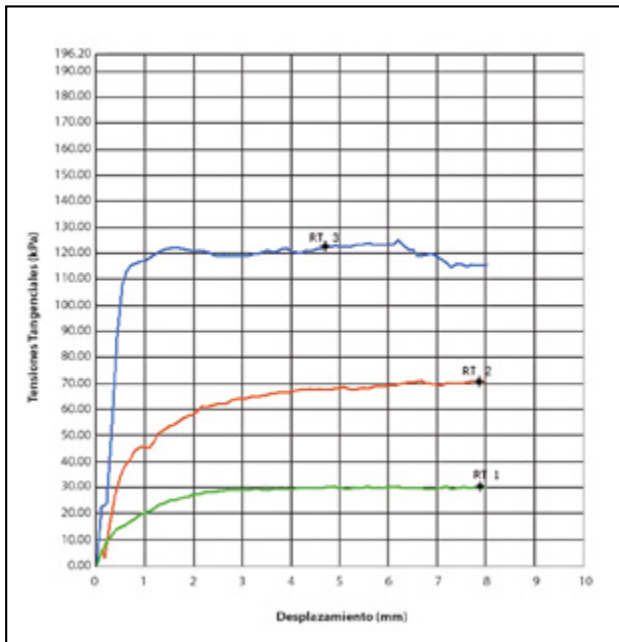


Figura 16. Curva de rotura del ensayo de corte hormigón-arcilla a 40°C.

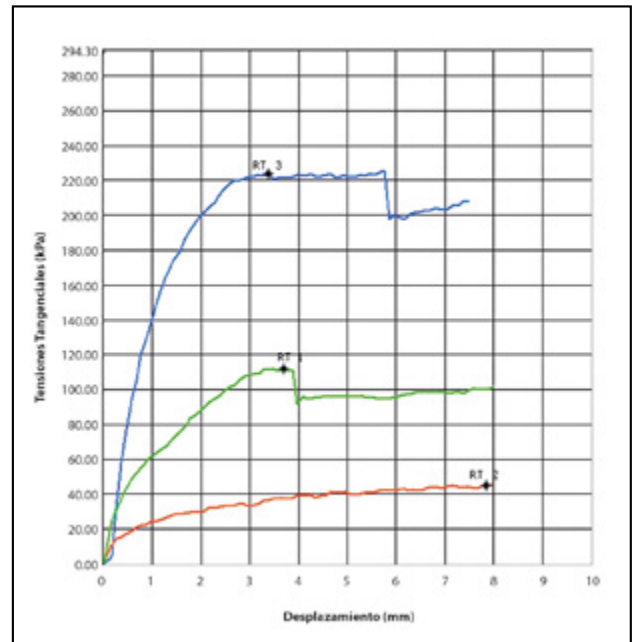


Figura 18. Curva de rotura del ensayo de corte arena-hormigón a temperatura ambiente.

4.2. Suelo arenoso

Se muestran a continuación las curvas de rotura de los ensayos de corte entre arena-arena y hormigón arena.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Con estos ensayos se buscó comprobar la influencia de la temperatura en los parámetros resistentes. A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diversos ensayos.

5.1. Suelo arcilloso

En la tabla 5 se presenta un resumen de los ensayos realizados con la muestra de arcilla, así como la variación del ángulo de rozamiento y la cohesión con la temperatura.

5.1.1. Comparativa entre muestra inalterada y remoldeada del suelo arcilloso

A continuación se muestra la relación que existe entre los parámetros resistentes de los ensayos 1 y 2, muestra inalterada y remoldeada respectivamente, a temperatura ambiente, así como la relación entre las tensiones tangenciales máximas en los puntos de rotura (tabla 6 y tabla 7).

Tabla 5. Resumen de los resultados de los ensayos de corte realizados con el suelo arcilloso

Ensayo	Probeta	Tipo	Forma	Temp. (°C)	σ_v^* (kPa)	t_{max}^* (kPa)	X* (mm)	ϕ^* (°)	c^* (kPa)
1	1	ARCILLA	Circular	21	50	60	7,7	28	30
	2	–	$\varnothing = 6$ cm	21	150	111	7,2		
	3	ARCILLA	Inalterado	21	300	195	3,3		
2	4	ARCILLA	Cuadrada	21	50	31	7,8	27	8
	5	–	L = 10 cm	21	150	86	7,8		
	6	ARCILLA	Remoldeada	21	300	160	7,9		
3	7	ARCILLA	Cuadrada	21	50	30	4,9	22	11
	8	–	L = 10 cm	21	150	74	5,9		
	9	HORMIGÓN	Remoldeada	21	300	133	4,5		
4	10	ARCILLA	Cuadrada	40	50	30	7,9	20	11
	11	–	L = 10 cm	41	150	71	8		
	12	HORMIGÓN	Remoldeada	41	300	123	8		

* σ_v : tensión normal* t_{max} : tensión de corte

*X : desplazamiento horizontal

* Φ : ángulo de rozamiento

*c : cohesión

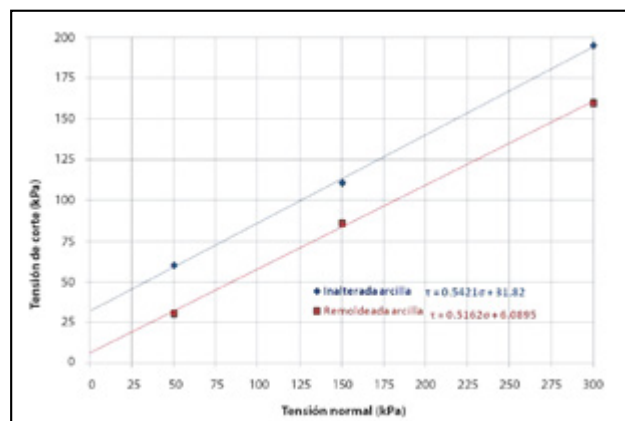
Tabla 6. Comparativa de los parámetros resistentes de los ensayos arcilla-arcilla inalterada y arcilla-arcilla remoldeada

Parámetro	Inalterada T = 21°	Remoldeada T = 21°	R / I
Φ (°)	28	27	0,96
C (kPa)	30	6	0,25

Tabla 7. Comparativa de la tensión normal respecto a la de corte de los ensayos con muestra remoldeada e inalterada

Tensión normal (kPa)	50	150	300
Tensión de corte (kPa) muestra inalterada T = 21°	60	111	195
Tensión de corte (kPa) muestra remoldeada T = 21°	30	86	160
$t_{remoldeada} / t_{inalterada}$	0,5	0,8	0,8

En la figura 19 se muestra la gráfica comparativa de ambas tensiones de corte al aplicar las diferentes tensiones normales.

**Figura 19.** Tensiones normales vs tensiones tangenciales entre muestra inalterada y remodelada de arcilla.

Analizando los resultados obtenidos se observa que el ángulo de rozamiento es muy similar en ambos ensayos

mientras que la cohesión disminuye alrededor de un 70 % (tabla 6 y figura 19). Esto puede ser debido a la susceptibilidad de las arcillas. Terzaghi definió la susceptibilidad de una arcilla como el cociente entre la resistencia al corte sin drenaje de dicha arcilla en su estado natural y después de ser enérgicamente amasada a contenido de humedad constante. Se puede esperar que las arcillas ensayadas en la caja de corte sean de susceptibilidad media (Jimenez Salas & Justo Alpañes, 1975) Según Terzaghi y Peck (1973) la mayoría de las arcillas son de susceptibilidad media.

5.1.2. Comparativa entre ensayo arcilla-arcilla y hormigón-arcilla a temperatura ambiente

A continuación se muestran en la tabla 8 los parámetros resistentes de los ensayos 2 y 3, así como la relación que existe entre el ángulo de rozamiento del suelo y el de la interfaz hormigón-suelo.

Tabla 8. Comparativa de los parámetros resistentes de los ensayos arcilla-arcilla y arcilla-hormigón a temperatura ambiente

Parámetro	Suelo - Suelo T = 21°	Suelo - Hormigón T = 21°	T_{s-H} / T_{s-s}
Φ o δ (°)	25	22	0,9
C o C_a (kPa)	8	8	1

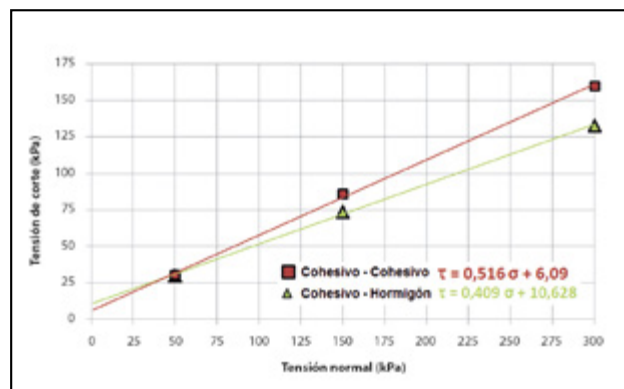
En la tabla 9 se muestra el valor de las tensiones de corte obtenidas en los ensayos 2 y 3.

En la figura 20 se observa los valores de la tensión normal y tensión tangencial obtenidos en los ensayos realizados a temperatura ambiente entre suelo-suelo y hormigón-suelo

En las muestras ensayadas, arcilla-arcilla y hormigón-arcilla, se observó que el ángulo de rozamiento disminuyó un 10 % y la cohesión se mantuvo prácticamente constante. Para esta muestra de suelo el ángulo de fricción del contacto pilote-terreno equivale a 0,9 veces el ángulo de rozamiento interno del suelo.

Tabla 9. Comparativa de la tensión normal respecto a la de corte de los ensayos arcilla-arcilla y arcilla-hormigón a temperatura ambiente

Tensión normal (kPa)	50	150	300
Tensión de corte (kPa) Arcilla-Arcilla T = 21°	30,5	86	160
Tensión de corte (kPa) Hormigón-Arcilla T = 21°	30	74	132,7
τ_{s-H} / τ_{s-S}	1	0,9	1

**Figura 20.** Tensiones normales vs tensiones tangenciales en los ensayos de corte arcilla-arcilla y hormigón-arcilla.

Estos resultados se encuentran dentro de los parámetros obtenidos por Potyondi (1961) en los ensayos hormigón-arcilla donde la relación f/δ está en 0,95 para una interfaz rugosa o por Hammoud, y Boumekik (2006) donde para diversas arcillas la relación se encuentra entre 0,81 y 1,1. En el estudio de Kulhawy, et al. (1983) establece un valor de 1 para esta misma relación empleando hormigón rugoso. Potyondi (1961) establece una relación de 1 entre la adherencia y la cohesión de la arcilla, corroborando el resultado obtenido en estos ensayos. La Recomendación Geotécnica para las Obras Marítima y Portuaria (ROM 0.5-05) toma este valor como dos tercios del ángulo de fricción del suelo (0,7); el Código Técnico de la Edificación toma este valor entre 0,9 y 1 para pilotes prefabricados e “in situ”, respectivamente.

5.1.3. Comparativa hormigón-arcilla a distintas temperaturas

A continuación se muestra la relación entre los parámetros resistentes obtenidos en los ensayos de corte 3 y 4 con la muestra de suelo arcilloso a distintas temperaturas (tabla 10), así como los valores de las tensiones de corte a temperatura ambiente y a 40°C (tabla 11).

Tabla 10. Comparativa de los parámetros resistentes de los ensayos hormigón-arcilla a distintas temperaturas

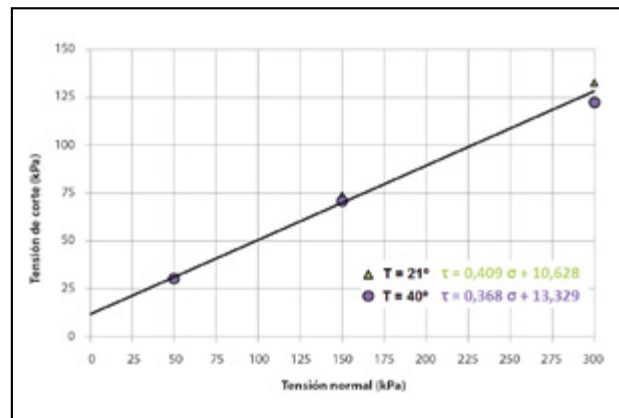
Parámetro	Ensayo a T = 21°	Ensayo a T = 40°	T_{40} / T_{21}
δ (°)	22	20	0,9
Ca (kPa)	11	11	1

En la tabla 11 se muestra el valor de las tensiones de corte obtenidas en los ensayos 3 y 4.

Tabla 11. Comparativa de la tensión normal respecto a la de corte de los ensayos arcilla-hormigón a distintas temperaturas

Tensión normal (kPa)	50	150	300
Tension de corte T = 21°	30	74	132,7
Tension de corte T = 40°	30,3	71	122,6
τ_{40} / τ_{21}	1	1	1

Al salir los valores muy similares de las tensiones de corte obtenidas a diferente temperatura, se representa el valor medio de éstas (figura 21).

**Figura 21.** Media de tensiones normales y tensiones de corte a distintas temperaturas entre hormigón-arcilla.

La tensión de corte disminuye de forma poco significativa para una misma tensión normal con un aumento de la temperatura y la relación entre ambas (τ_{40} / τ_{21}) a medida que se aumenta dicha tensión normal se aleja de la unidad (tabla 11). Los resultados que se observan en la tabla 10 son resultado de la interpretación de los resultados obtenidos, el resultado matemático se observa en la figura 21. Sería necesario realizar un ensayo a una tensión normal mayor para confirmar el descenso de la tensión de corte con la temperatura. Con los datos obtenidos no se aprecia una gran variación ni de los parámetros resistentes ni de las tensiones tangenciales.

La variación en el valor de la cohesión en ambos ensayos es mínima pudiéndose afirmar que una variación de temperatura no supone una variación importante de las propiedades en la interfaz hormigón-arcilla.

5.2. Suelo arenoso

Se realizaron tres ensayos distintos: un ensayo de corte arena-arena y dos ensayos de corte hormigón-arena a distinta temperatura, según se observa en la tabla 12.

5.3. Comparativa entre ensayo arena-arena y hormigón-arena a temperatura ambiente

A continuación se muestran los resultados de los ensayos 1 y 2 realizados a temperatura ambiente de las muestras arena-arena y arena-hormigón (tabla 13).

En la tabla 14 se muestra el valor de las tensiones de corte obtenidas en los ensayos 1 y 2.

En la figura 20 se presenta la gráfica comparativa de ambas tensiones de corte al aplicar las diferentes tensiones normales durante los ensayos 1 y 2.

Tabla 12. Resumen de los resultados de los ensayos de corte realizados con el suelo arenoso

Ensayo	Probeta	Tipo	Forma	Temp. (°C)	σ_v^* (kPa)	t_{max}^* (kPa)	X* (mm)	Φ^* (°)	c* (kPa)
1	1	ARENA	Cuadrada	21	50	54	7,1	39	0
	2	–	L = 10 cm	21	150	166	7,9		
	3	ARENA	Remoldeada	21	300	237	7,8		
2	4	ARENA	Cuadrada	21	50	49	7,8	36	14
	5	–	L = 10 cm	21	150	126	2,8		
	6	HORMIGÓN	Remoldeada	21	300	230	3,2		
3	7	ARENA	Cuadrada	41	50	43	1,7	34	9
	8	–	L = 10 cm	41	150	112	2		
	9	HORMIGÓN	Remoldeada	41	300	214	2,1		

* σ_v : tensión normal* t_{max} : tensión de corte

*X : desplazamiento horizontal

* Φ : ángulo de rozamiento

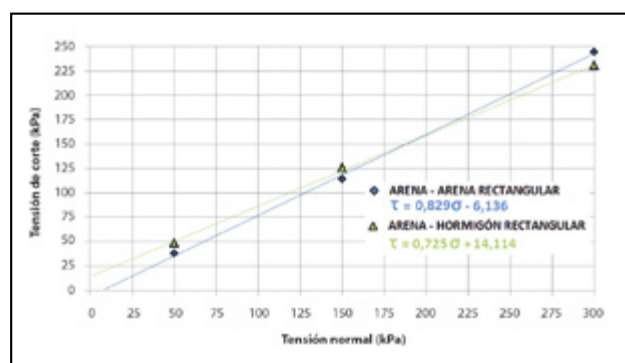
*c : cohesión

Tabla 13. Comparativa de los parámetros resistentes de los ensayos arena-arena y arena-hormigón a temperatura ambiente

Parámetro	Arena - Arena T = 21°	Arena - Hormigón T = 21°	T_{A-H} / T_{A-A}
δ (°)	39,5	36	0,91
C_o (kPa)	0	14	-

Tabla 14. Comparativa de la tensión normal respecto a la de corte de los ensayos arena-arena a temperatura ambiente

Tensión normal (kPa)	50	150	300
Arena - Arena T = 21°	38	114	244
Arena - Hormigón T = 21°	49	126	230
τ_{A-H} / τ_{A-A}	1,3	1,1	0,95

**Figura 22.** Tensiones normales vs tensiones tangenciales en los ensayos de corte arena-arena y arena-hormigón a temperatura ambiente.

Para esta muestra de suelo el ángulo de fricción del contacto pilote-terreno equivale a 0,9 veces el ángulo de rozamiento interno del suelo.

Estos resultados no coinciden respecto a Gireesha y Muthikkumar (2011) donde obtiene relaciones del ángulo de rozamiento para una arena de densidad relativa del 50 % de 0,78 pero si se acercan más a los resultados de Potyondy (1961) donde para una interfaz rugosa de densidad relativa 66% obtiene relaciones del ángulo de rozamiento 0,98 o lisa de 0,89. La Recomendación de Obras Marítimas y Costeras (ROM) toma este valor como 1 tanto en

pilotes hormigonados “in situ” como prefabricados, el Código Técnico de la Edificación toma este valor entre 0,9 y 1 para pilotes prefabricados e “in situ”, respectivamente.

De los parámetros resistentes obtenidos se observa que el ángulo de rozamiento desciende un 9 % en el ensayo hormigón-arena, respecto a una muestra arena-arena, mientras que la cohesión adquiere un valor de 14 Kpa respecto a la muestra arena-arena. (figura 22).

Respecto a la evolución de la tensión de corte con el aumento de la tensión normal, se observa que a medida que aumenta esta, la relación (τ_{A-H} / τ_{A-A}) disminuye desde 1,3 a 0,95 siendo un valor de 1 cuando la tensión normal es aproximadamente 195 kPa (tabla 14).

5.2.2. Comparativa hormigón-arena a distintas temperaturas

En la tabla 15 se observan los parámetros resistentes de los ensayos 2 y 3 así como la relación existente entre ellos al variar la temperatura.

Tabla 15. Comparativa de los parámetros resistentes de los ensayos arena-hormigón a distintas temperaturas

Parámetro	Ensayo a T = 21°	Ensayo a T = 40°	T_{40} / T_{21}
δ (°)	35,94	34,37	0,96
Ca (kPa)	14	9	0,6

En la tabla 16 se muestra el valor de las tensiones de corte obtenidas en los ensayo 2 y 3.

Tabla 16. Comparativa de la tensión normal respecto a la de corte de los ensayos arena-hormigón a distintas temperaturas

Tensión normal (kPa)	50	150	300
Tensión de corte T = 21°	49	126	230
Tensión de corte T = 40°	43	112	214
τ_{40} / τ_{21}	0,9	0,9	0,93

En la figura 23 se muestra la gráfica comparativa de ambas tensiones de corte, en ensayos a distinta temperatura, al aplicar las tres tensiones normales en los ensayos 1 y 2.

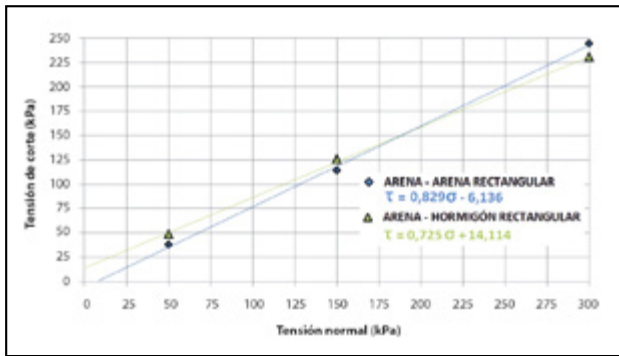


Figura 23. Representación de los parámetros resistentes de los ensayos realizados a temperatura ambiente y a 40° de las muestras arena-hormigón según el criterio Morh-Coulomb.

Para una misma tensión normal a medida que se aumenta la temperatura el valor de la tensión de corte disminuye. Si aumenta la tensión normal la relación entre la tensión de corte a temperatura de 40° y a temperatura ambiente (τ_{40} / τ_{21}) se acerca a la unidad (Tabla 16).

Al variar la temperatura de la muestra hormigón-arena a temperatura ambiente y a 40°C, respecto a los parámetros resistentes, se observa que el ángulo de rozamiento desciende sensiblemente, 2° (4 %) cuando se aumenta la temperatura. Por otra parte la cohesión manifiesta un efecto mayor disminuyendo un 37 % del valor (tabla 15 y figura 23).

6. CONCLUSIONES

Con este documento se ha intentado obtener la influencia que tiene la temperatura en los parámetros resistentes; ángulo de rozamiento (Φ) y cohesión (c), en la interfaz hormigón-suelo. Para ello se han empleado dos tipos de suelo, uno cohesivo y otro arenoso. Las temperaturas estudiadas son la ambiental y a 40°C.

En la muestra de arcilla empleada el ángulo de rozamiento disminuyó de forma poco significativa con un aumento de la temperatura, los resultados obtenidos en los ensayos muestran un comportamiento muy similar. En los ensayos realizados con la arena el ángulo de rozamiento disminuye entorno a un 5% con un aumento de temperatura de 20°C en el ensayo, esta disminución no es significativa.

La adherencia entre el hormigón y la arcilla con el aumento de la temperatura

El aumento de la temperatura en la muestra de arcilla no afecta a la adherencia, manteniéndose este parámetro constante. En la arena ensayada, un aumento de la temperatura produce una disminución de la adherencia, entre el hormigón y la muestra de arena, del 40%. Para confirmar dichos resultados es conveniente realizar un mayor número de ensayos y con una tensión normal mayor.

Las tensiones de corte obtenidas a 40°C son menores respecto a la temperatura ambiente pero con un comportamiento diferente según el tipo de suelo. La relación entre las tensiones tangenciales (τ_{40} / τ_{21}) en la arcilla son muy parecidas mientras que para la arena estas relaciones (τ_{40} / τ_{21}) están alrededor de 0,9 con lo que la variación es poco significativa.

En general se puede decir que los resultados obtenidos para las interfaces suelo-hormigón son buenos ya que los

parámetros resistentes apenas varían con el aumento de la temperatura.

En su aplicación a las cimentaciones termoactivas u otro tipo de estructuras afectadas por la temperatura, los efectos que pueden provocar en los parámetros resistentes son mínimas a la hora de calcular los esfuerzos de dichos elementos estructurales con el número de ensayos realizados hasta el momento.

Las posibilidades de investigación futuras serían realizar este mismo ensayo a temperaturas más altas, entre 60° y 80° o más bajas incluso llegando a temperatura bajo 0° para ver cómo evolucionan los parámetros c y ϕ para corroborar los datos con los obtenidos en este estudio. Realizar estos mismos ensayos a tensiones más altas para confirmar la tendencia de los parámetros.

Otras vías de investigación serían: ver como varía el módulo de Young, tensiones en valores residuales, influencia de la rugosidad en la muestra de hormigón, ensayar con muestras de suelo con distintas humedades, etc.

Además del hormigón, emplear otros materiales de construcción como madera, acero, plásticos que también se emplean comúnmente en la ingeniería civil.

7. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a todos los profesores del máster por intentar transmitirnos de la mejor manera sus conocimientos respecto a las distintas áreas de la geotecnia.

A mis compañeros por lo momentos que hemos vivido durante estos meses.

A mi familia que siempre me apoyado en todos los momentos de mi vida y en todas las decisiones que he tomado, como la de realizar este máster.

A mi tutora de tesis, María, que me ha ayudado gentilmente y generosamente durante la realización de esta tesina.

Finalmente al personal del CEDEX sobre todo a José Estaire, José Luis Toledo, Felipe García, Antonio Baudet, Manolo Pintado, José Luis Fernández y Mauro Muñoz, por permitirnos realizar los ensayos necesarios, mostrar su modesta opinión o simplemente ayudar para la realización de la tesina a costa de su tiempo.

8. BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos. UNE-EN ISO 1302:2002. Madrid. 2002

Bourne-Webb, P., Amatya, K., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., & Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique* 59, 237-248.

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other Thermo-Active Ground Structures. *Geotechnique* 56(2), 81-122.

Código técnico de la edificación, 2006

Flavigny, E., Desrues, J., & Palayer, D. (1990). Le sable d'hos-tun-note technique. *Revue Française de Geotechnique*(53), 67-69.

Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Sloiman, H.H.. Roughness parameters. *Journal of Material Processing Technology* No.123, (2002). pp. 133-145

Gireesha, N. T y Muthukkumaran, K. (2011). Study on Soil Structure Interface Strength Property. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 89-93, ISSN 0974-5904

Hammoud F. y Boumekik, A. (2006). Experimental Study of The Behaviour of Interfacial Shearing Between Cohesive Soils and Solid Materials at Large Displacement. *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, Vol. 7, No. 1, pp. 63-80

Kulhawy, F. H. .“Limiting tip and side resistance: fact or fallacy”. *Proc. of the Conference on Analysis and Design of Pile Foundations*, San Francisco, California, 1–5 Octubre 1984, pp. 80–98.

Laloui, L. (2008). Heat exchanger geostructures. Static behaviour under temperature variations. *Energetic geostructures Workshop*. London.

Laloui, L. (2011). In-situ testing of a heat exchanger pile. *Geo-Frontiers* , 410-419.

Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics* 30(8) , 401-13.

Potyondy, J. G., Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials, *Geotechnique*, Vol. 11, No. 4, Dec. 1961, pp. 339-353.

Puertos del Estado, Ministerio de Fomento. Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, ROM 0.5-05. Madrid. 2005.

Terzaghi, K., & Peck, R. (1973). *Mecanica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Buenos Aires: El ateneo.



Cargas admisibles de cimentaciones en roca basadas en un criterio de rotura no lineal

Autores: Alcibíades Serrano González y Claudio Olalla Marañón

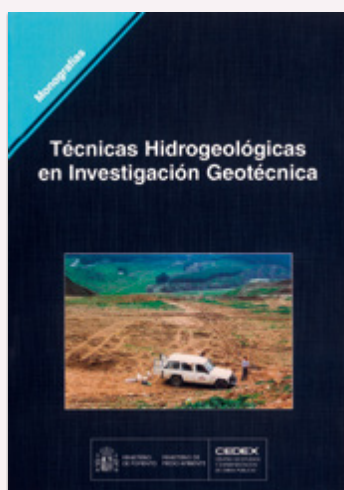
Serie Monografías: M-54

ISBN: 84-7790-373-5

Año: 2002 (2ª Edición)

PVP: 9€

En este documento, se discute la aplicación de este método y, a continuación, se presentan ábacos y tablas para su uso directo, en función de la inclinación del talud, de la inclinación de la carga al nivel de los cimientos y de la sobrecarga equivalente actuante de las inclinaciones. Además, se discuten los órdenes de magnitud de los coeficientes de seguridad a emplear para obtener la carga admisible.



Técnicas hidrogeológicas en investigación geotécnica

Autores: José Luis Salinas Rodríguez y Antonio Plata Bedmar

Serie Monografías: M-78

ISBN: 84-7790-388-3

Año: 2003

PVP: 15€

La monografía describe ensayos hidrogeológicos que pueden ser empleados para reconocimientos geotécnicos en los diversos ámbitos de ingeniería civil en que es necesario evaluar la presencia de agua subterránea. Además de una completa revisión de las técnicas hidrogeológicas habitualmente utilizadas en geotecnia, en general partiendo de sondeos, la aportación novedosa de este trabajo consiste en el análisis de procedimientos adecuados para determinar, a partir de los flujos que origina, el comportamiento dinámico del agua en el terreno. Complementando el necesario cuerpo metodológico, se presentan ejemplos reales de aplicación en que estas técnicas han aportado información relevante para la problemática planteada.



Estabilidad de taludes rocosos infinitos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociadas

Autores: Alcibíades Serrano González, Claudio Olalla Marañón y Jesús Manzanás López

Serie Monografías: M-80

ISBN: 84-7790-401-4

Año: 2004

PVP: 12€

Se analiza la estabilidad de taludes en roca, semi-infinitos, (en faja), con hipótesis de comportamiento de tipo Hoek y Brown (1980), en su versión original y en la modificada (1992), para distintas configuraciones de presiones intersticiales. Se supone un criterio de rotura tanto de tipo asociativo, como con hipótesis de leyes de fluencia en la rotura no asociativas. Se contrastan los resultados con otras herramientas de cálculo y se analizan casos reales. Se ofrecen unos ábacos para facilitar su aplicación, así como una hoja de cálculo (EXCEL).