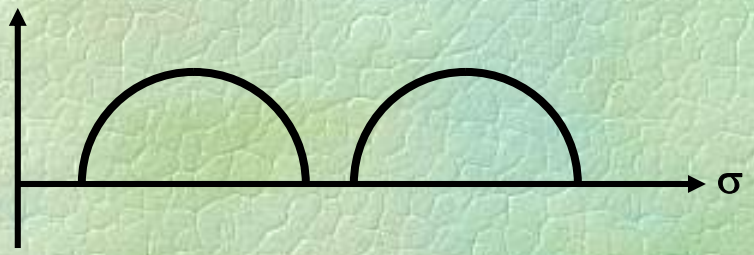
TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Introducción

- Hasta ahora sabemos cómo calcular las tensiones en el terreno:
  - Peso propio + acciones exteriores.
  - Círculos de Mohr (tensiones efectivas y tensiones totales).



- ¿El terreno resiste esas tensiones? En este tema se estudia.
  - SI ⇒ Se puede realizar la construcción que transmite esas tensiones.
  - NO ⇒ Hay que rediseñar la obra para reducir las tensiones.
  - NO ⇒ Si se construye la obra tal como está diseñada, se producirá el fallo (colapso) del terreno.

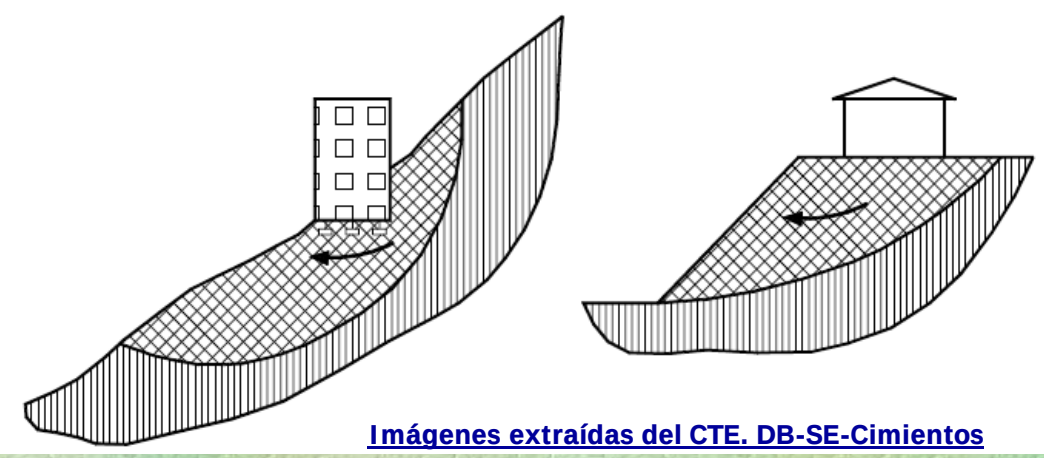
TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Definición de fallo de un suelo (I)

➔ El suelo no es capaz de resistir esfuerzos de tracción.

➔ Sí puede resistir esfuerzos de compresión.

➔ Se produce el fallo en forma de ***deslizamiento*** a lo largo de una superficie interna del terreno.



Imágenes extraídas del CTE. DB-SE-Cimientos

➔ La resistencia de un suelo es una función de su resistencia al deslizamiento ⇔ Resistencia al esfuerzo cortante.

➔ Depende de:

❶ Fuerza normal entre superficies deslizante y fija.

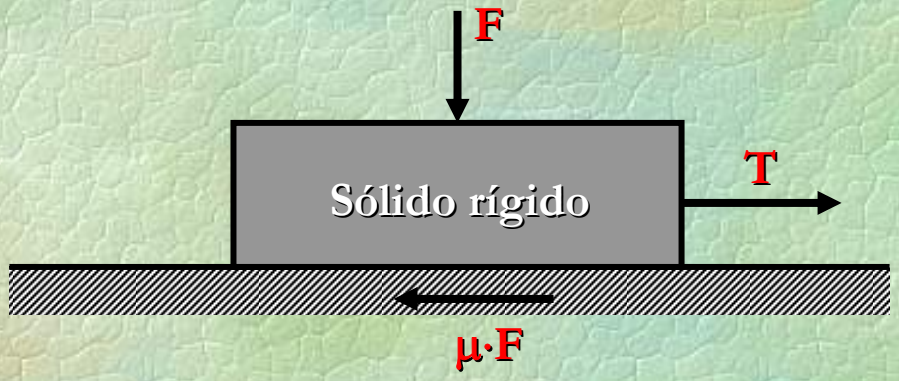
❷ Rozamiento entre partículas.

❸ Cohesión.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Criterio de fallo de Mohr-Coulomb (I)

Analogía con el comportamiento de un sólido rígido



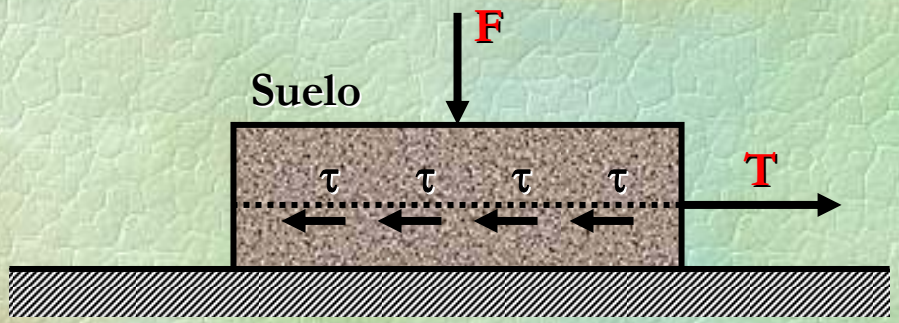
- Se producirá el deslizamiento del sólido sobre la superficie si $T \geq \mu \cdot F$.
- μ es el coeficiente de rozamiento entre sólido y superficie.
- Cuanto mayor sea la fuerza F, mayor será la fuerza de rozamiento $\mu \cdot F$.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Criterio de fallo de Mohr-Coulomb (II)

Analogía con el comportamiento de un sólido rígido:

¿qué ocurriría en una "pastilla" de suelo?



➔ Comienza a producirse el deslizamiento entre la mitad superior y la mitad inferior cuando:

$$\frac{T_{máx}}{A} = \frac{F_{R\phi}}{A} = \frac{\mu_\phi \cdot F}{A} = \mu_\phi \cdot \sigma = \sigma \cdot tg\,\phi \qquad \frac{T_{máx}}{A} = \tau_{máx} = \tau_f$$

$$\boxed{\tau_f = \sigma \cdot tg\,\phi}$$

ϕ es el "ángulo de rozamiento interno", y es una constante del suelo

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Criterio de fallo de Mohr-Coulomb (III)

➔ No todos los suelos se comportan igual.

➔ Las arcillas presentan "cohesión", independientemente de F, que también aporta resistencia.

La "cohesión" se representa por c y también es una constante del suelo

➔ Por lo tanto, en un suelo genérico la ley que regula su comportamiento resistente sería:

$$\tau_f = c + \sigma \cdot tg\,\phi$$

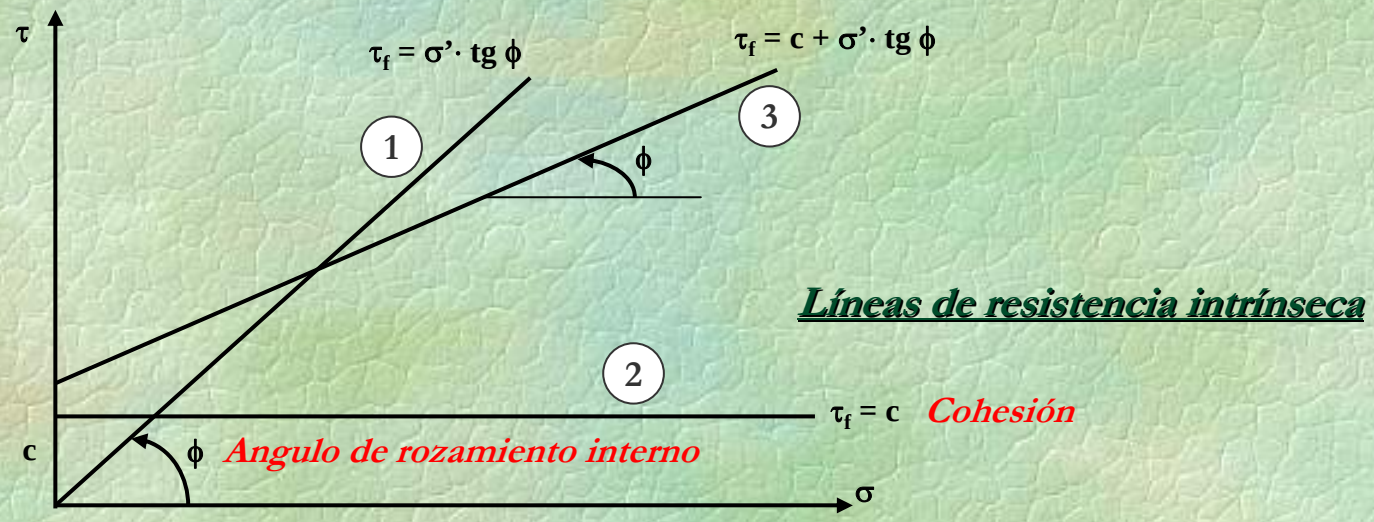
➔ En 1925, Terzaghi observa diferencias con la experiencia y modifica la expresión:

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot tg\,\phi$$

➔ Además, puesto que en algunos tipos de suelos su comportamiento es variable en el tiempo, se hablará de una resistencia "rápida" o "a corto plazo" y otra "lenta" o "a largo plazo“, con parámetros ϕ y c distintos, tal como se puede observar en la página siguiente.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Criterio de fallo de Mohr-Coulomb (IV)



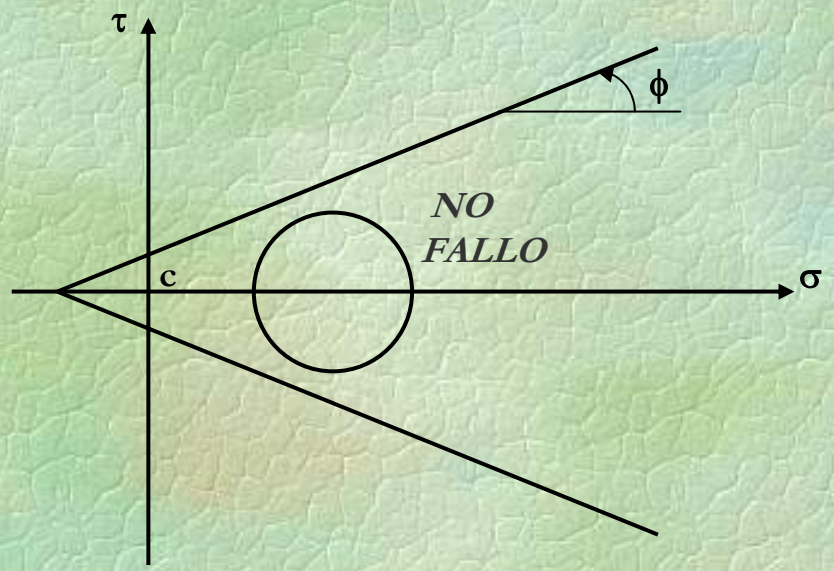
① *Suelos granulares y arcillas NC en condiciones de drenaje (largo plazo).*

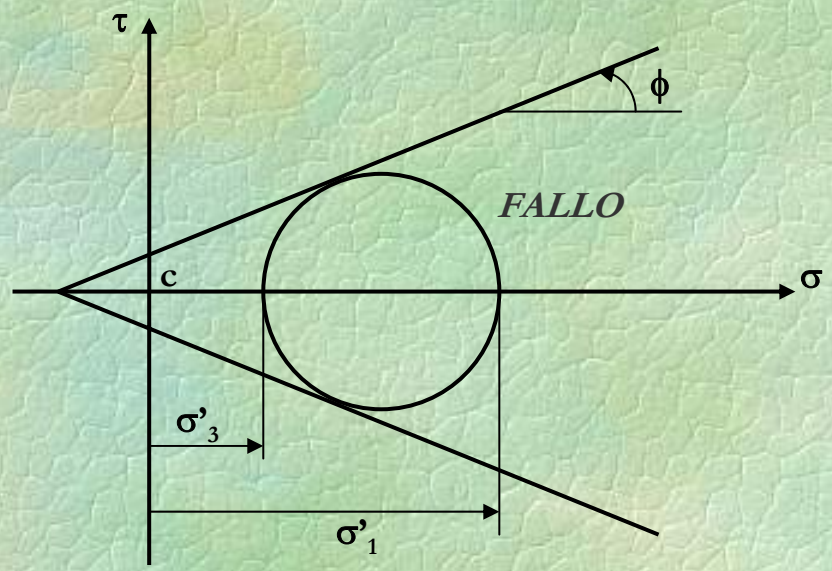
② *Cualquier tipo de arcilla sin posibilidad de drenaje (corto plazo).*

③ *Arcillas sobreconsolidadas en condiciones de drenaje (largo plazo) y suelos que contienen todo tipo de partículas.*

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Criterio de fallo de Mohr-Coulomb (V)





➔ Por lo tanto, conocido el estado de tensiones en un punto del suelo y representado mediante el círculo de Mohr, se comparará con la recta de resistencia intrínseca (ver figuras) dando lugar a situaciones de "fallo" o "no fallo".

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + 2 \cdot c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

Expresiones que relacionan las tensiones principales en un punto del suelo con sus parámetros resistentes, ϕ y c, en la situación de fallo.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

La prueba de corte directo (I)

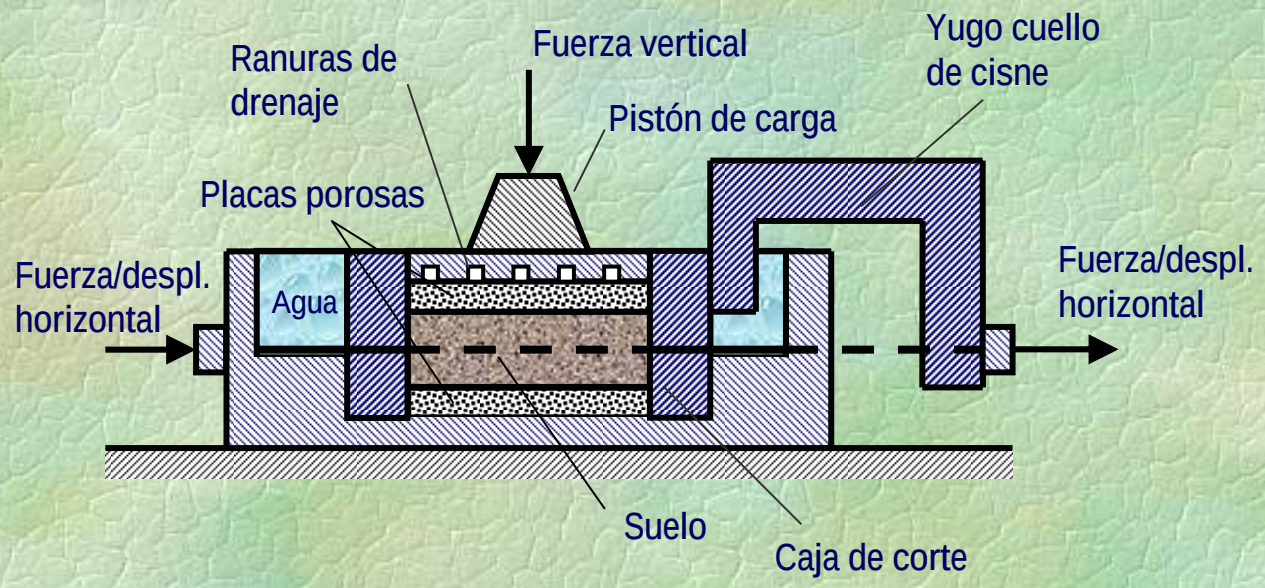
- Es una prueba relativamente sencilla que reproduce la rotura de un suelo tal como la estudió Coulomb.
- Se emplea en arenas y limos arenosos.
- Consiste en aplicar una fuerza horizontal que separa en dos partes una muestra de suelo y medir cuánta fuerza es necesaria para producir esa rotura.
- Se lleva a cabo en aparatos de corte directo, como el representado de forma esquemática en la página siguiente, y en la fotografía adjunta.
- Este ensayo está normalizado según las normas UNE 103401:1998 y ASTM D3080-04.

Imagen procedente del Catálogo de Controls S.L.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

La prueba de corte directo (II)

Esquema de un aparato de corte directo



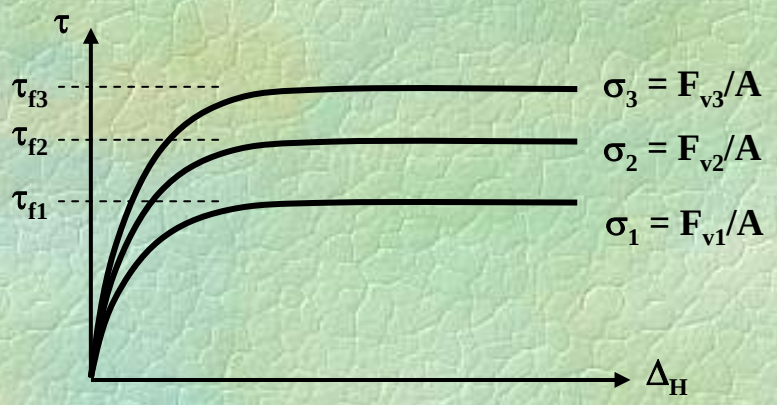
Fases del ensayo:

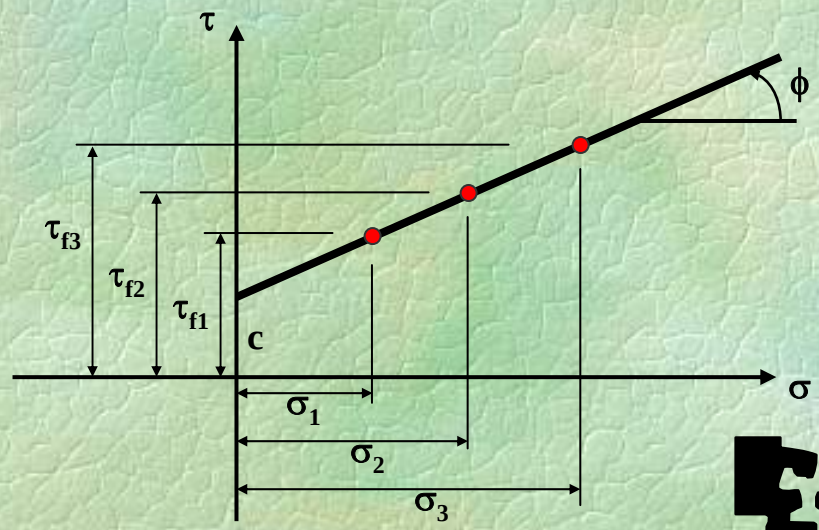
1. *Aplicación fuerza vertical.*
2. *Aplicación fuerza / desplazamiento horizontal.*
3. *Medida simultánea del desplazamiento horizontal / fuerza.*

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

La prueba de corte directo (III)

- El ensayo se realiza con tres muestras del mismo suelo para cargas verticales distintas.
- Para cada muestra se representa un diagrama de desplazamiento relativo horizontal frente a la carga horizontal creciente aplicada (figura derecha).
- En la situación de fallo se tiene la tensión de fallo, τ_f, y la tensión vertical, σ, que estarán sobre la línea de resistencia intrínseca del suelo.
- Se sitúan los tres puntos de los tres ensayos en el diagrama (figura derecha) y se dibuja la recta, obteniéndose la cohesión y el ángulo de rozamiento interno del suelo.

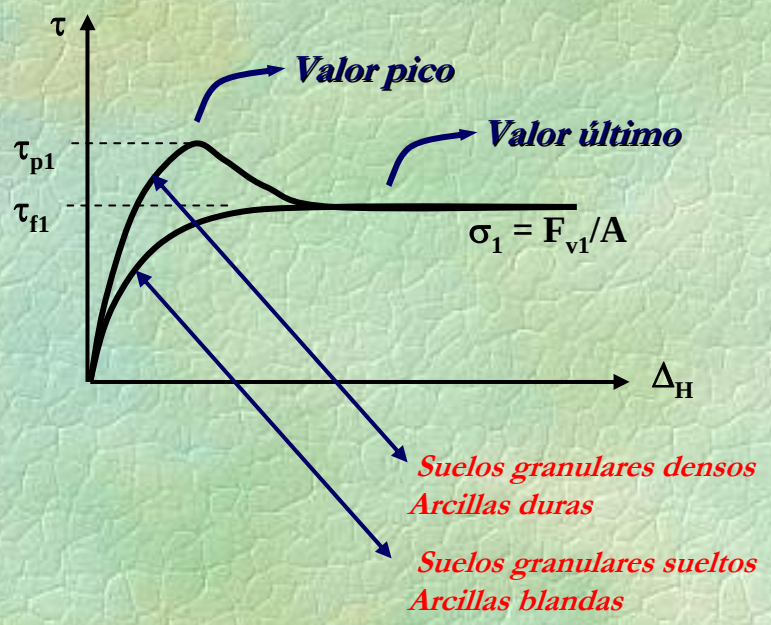




TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

La prueba de corte directo (IV)

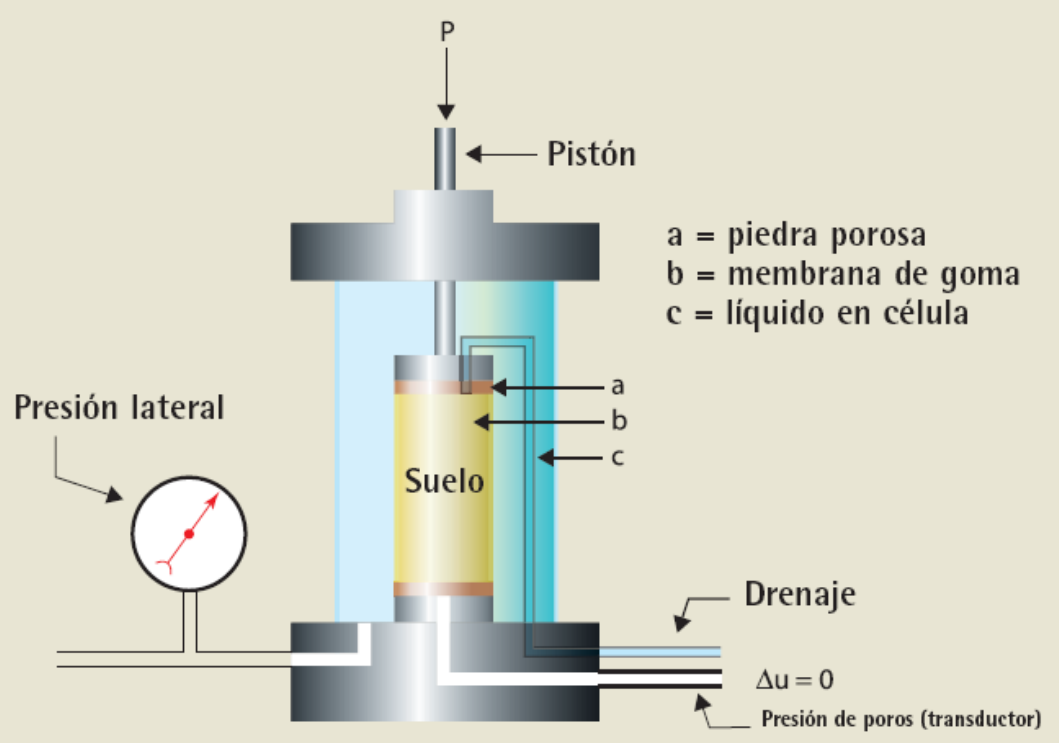
- En el caso de suelos granulares densos y arcillas duras, se obtiene un valor máximo (pico) de la resistencia del suelo, τ_p.
- Y un valor último de la resistencia, que por seguridad es el que se toma como tensión de fallo, τ_f.



TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (I)

- La prueba de corte directo no representa el comportamiento real del suelo.
- Las pruebas triaxiales (biaxiales) son más adecuadas.
- Están normalizadas según UNE 103402:1998, ASTM D4767-04 y ASTM D2850-03a(2007).

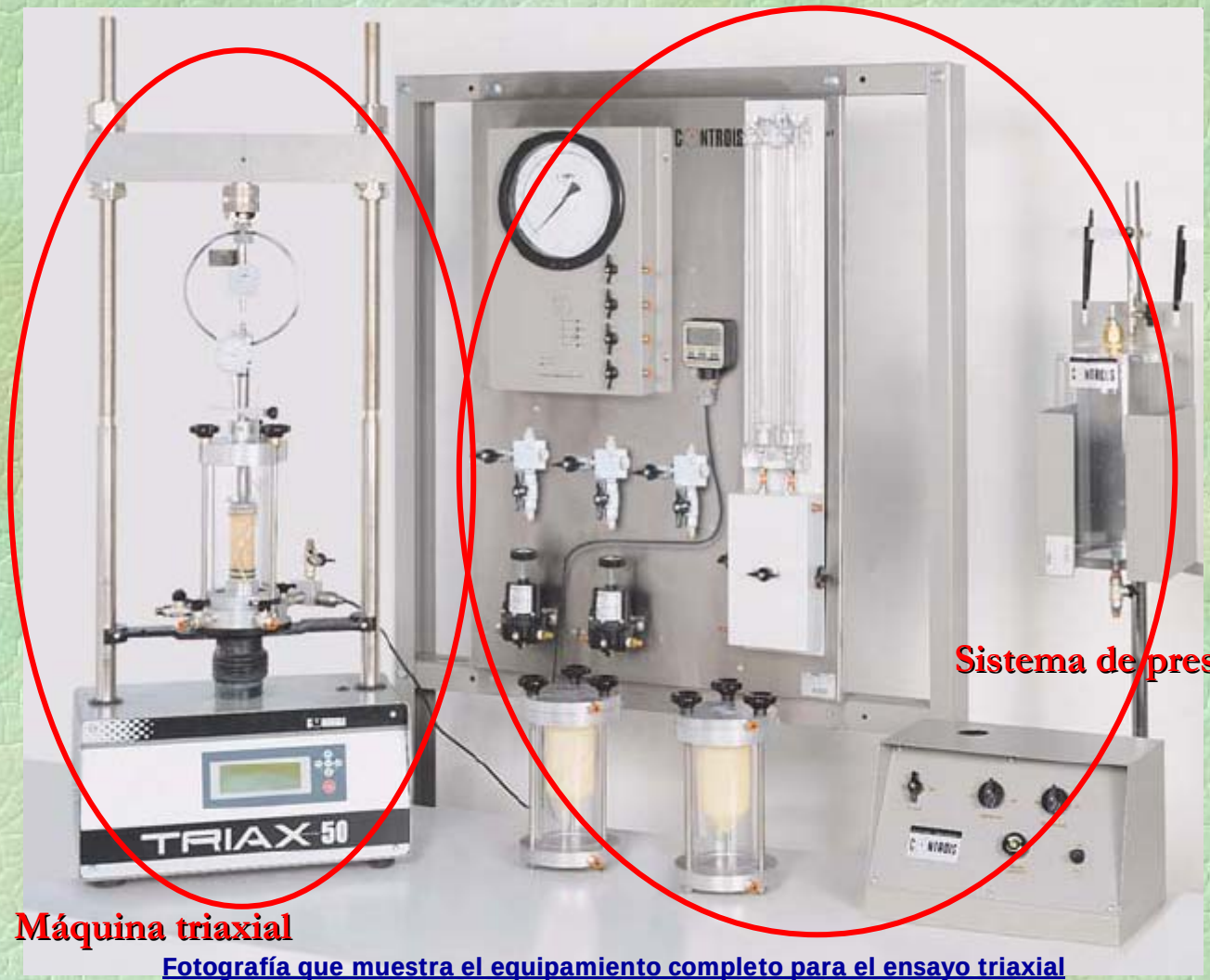


Esquema de los elementos fundamentales de un ensayo triaxial

Imagen procedente del Catálogo de Controls S.L.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (II)



Fotografía que muestra el equipamiento completo para el ensayo triaxial

Imagen procedente del Catálogo de Controls S.L.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (III)

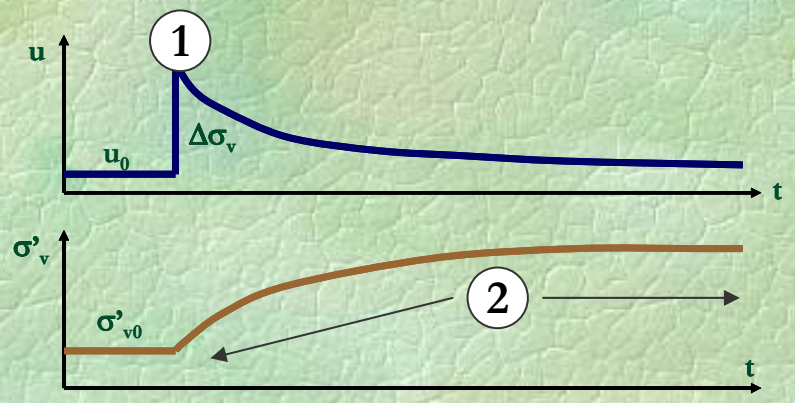
Fase I: Consolidación isótropa.

❶ Aplicación de presión en cámara.

- ➔ No se permite el drenaje del agua.
- ➔ Toda la presión de cámara se transmite al agua.

❷ Se permite el drenaje del agua.

- ➔ Hasta que la presión intersticial es nula.
- ➔ Toda la presión es soportada por las partículas sólidas, es decir, es una tensión efectiva.
- ➔ La tensión es la misma en todas las direcciones (isótropa).



TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (IV)

Fase II: Desviador.

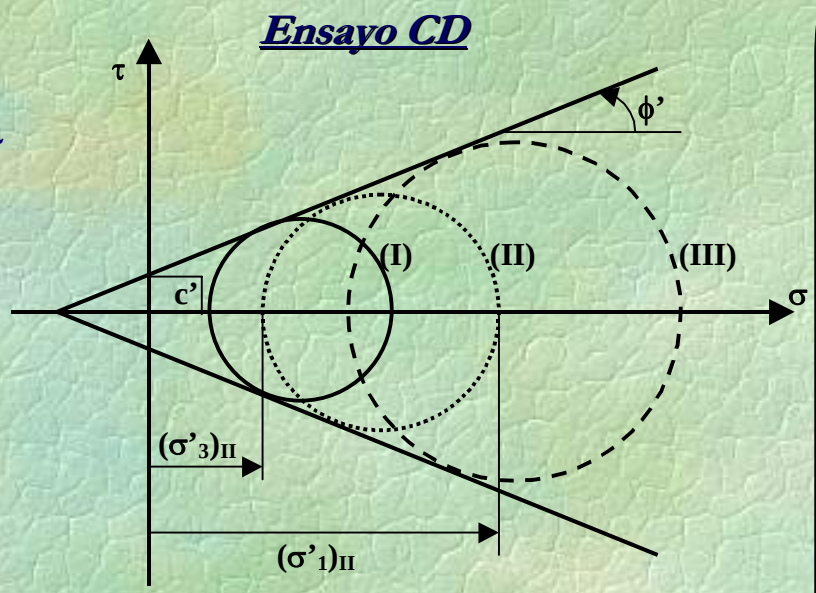
- Adicionalmente se aplica una fuerza vertical con el pistón.
  - ➔ El estado de tensiones deja de ser isótropo.
- Opción 1: Se permite el drenaje del agua.
  - ➔ Hasta que la presión intersticial es nula.
  - ➔ Toda la presión es soportada por las partículas sólidas, es decir, es una tensión efectiva.
  - ➔ El ensayo se denomina CD o lento.
- Opción 2: No se permite el drenaje del agua.
  - ➔ La presión intersticial NO es nula.
  - ➔ La presión intersticial SE PUEDE MEDIR.
  - ➔ El ensayo se denomina CU.
- Se sigue aumentando la fuerza hasta que se produce el fallo.
- Se dispone de las tensiones principales en el fallo.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (V)

- El ensayo se realiza con tres muestras del mismo suelo para presiones en cámara distintas.
- Para cada muestra se representa el círculo de Mohr en la situación de fallo y se dibuja la recta tangente (envolvente), obteniéndose la cohesión y el ángulo de rozamiento interno del suelo.
- En el ensayo CD se obtienen los parámetros resistentes del suelo en situación de drenaje, es decir, a largo plazo.

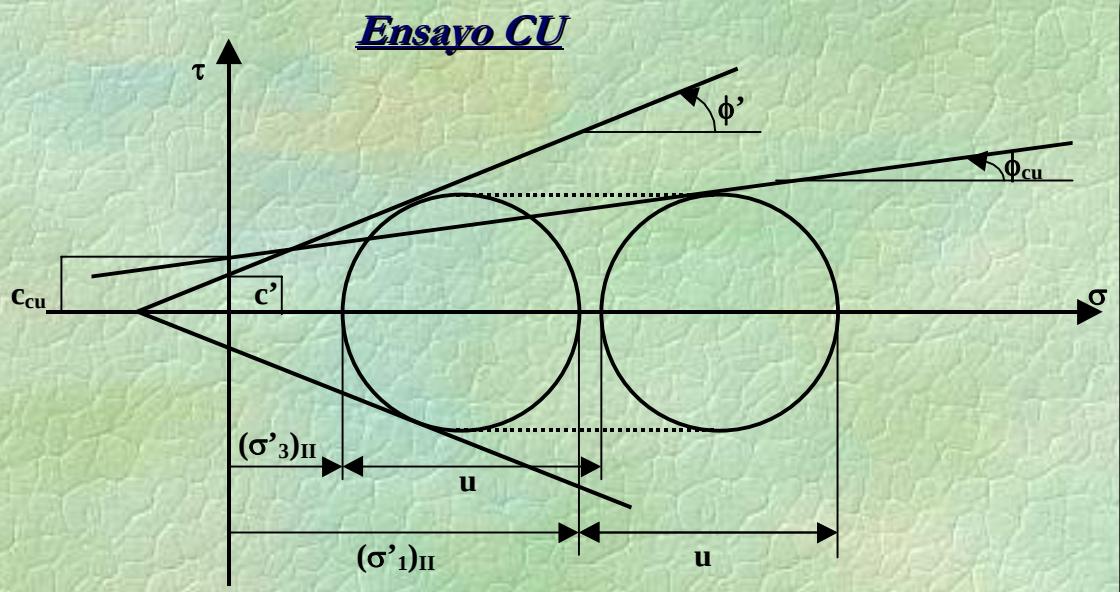
c', cohesión efectiva
ϕ', ángulo de rozamiento interno efectivo



TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (VI)

- En el ensayo CU se obtiene el círculo de Mohr en la situación de fallo en tensiones totales.
- Para obtener el círculo en tensiones efectivas, hay que restar la presión intersticial, que se mide en esta fase II.



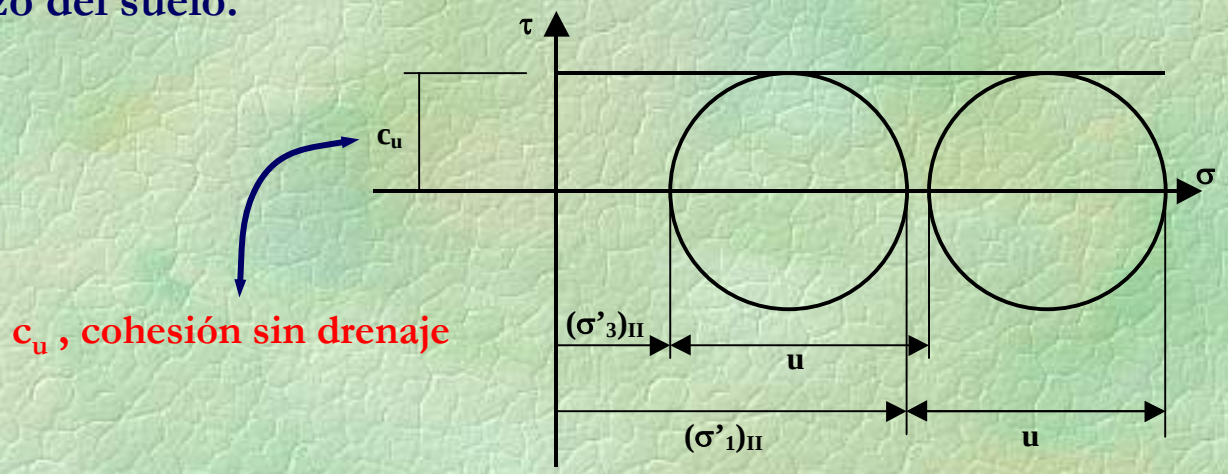
- El resultado final es equivalente al obtenido en el ensayo CD, pero considerablemente más rápido.
- En definitiva, en el ensayo CU también se obtienen los parámetros resistentes del suelo en situación de drenaje, es decir, a largo plazo.

c', cohesión efectiva
ϕ', ángulo de rozamiento interno efectivo

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Pruebas de compresión triaxial (VII)

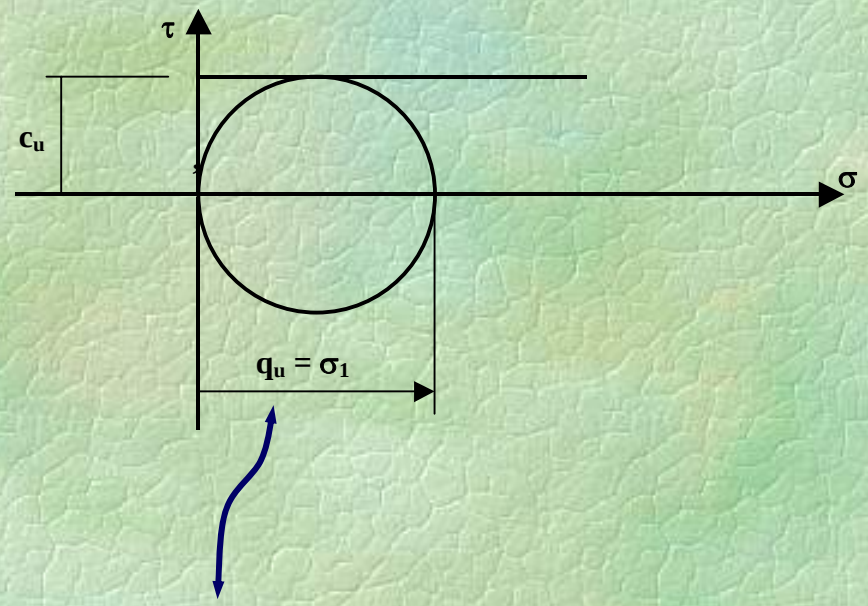
- El último tipo de prueba de compresión triaxial es el ensayo UU o ensayo rápido.
- El procedimiento es similar al descrito en los ensayo CD y CU, pero en este caso no se permite el drenaje del agua en ninguna fase, por lo que se produce una rotura rápida del suelo.
- Todos los círculos de Mohr obtenidos presentan el mismo diámetro (ver figura).
- Este ensayo proporciona información acerca de la resistencia a corto plazo del suelo.



TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Ensayo de compresión simple

- Consiste en aplicar una fuerza vertical creciente sobre la muestra de suelo hasta producir su fallo.
- El ensayo está normalizado según las normas UNE 103400:1993 y ASTM D2166-06.
- Realmente constituye un ensayo triaxial UU en donde la presión de cámara es nula.



q_u , resistencia a compresión simple

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Ensayo de molinete o "vane-test" (I)

- Este ensayo se realiza en el fondo de un sondeo. Es, por tanto, un ensayo geotécnico "in situ"que se utiliza en suelos cohesivos.
- Está normalizado según la norma ASTM D2573-08.
- El procedimiento consiste en introducir las aspas del molinete en el suelo y ejercer un momento de giro hasta que se produzca la rotura.
- Se representa en una gráfica cómo varía el ángulo girado con el momento aplicado y se toma el máximo valor M_u , que se correlaciona con la cohesión sin drenaje del suelo, c_u.

Imagen procedente del Catálogo de Controls S.L.

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Ensayo de molinete o "vane-test" (II)

$$c_u = \frac{2 \cdot M_u}{\pi \cdot D^2 \cdot H \cdot \left(1 + \frac{D}{3 \cdot H}\right)}$$

D, anchura total de las aspas del molinete

H, altura de las aspas del molinete

- Inconvenientes del ensayo que afectan a c_u:
  - Se alteran las propiedades del suelo al hincar las paletas.
  - Las tensiones cortantes en el suelo no son uniformes.
  - El ensayo se realiza en condiciones no drenadas.
  - No se puede medir la presión intersticial.
  - El valor de c_u es sistemáticamente superior al obtenido en ensayos triaxiales, por lo que se puede corregir con la expresión siguiente.

$$c_u\,(\text{real}) = \mu \cdot c_u\,(\text{medido}) \qquad \mu = 0'62 - 0'24 \cdot \ln(I_P)$$

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Valores de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno (I)

Tabla D.27. Propiedades básicas de los suelos

Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m^3)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	Grava	19 – 22	34º - 45º
	Arena	17 – 20	30º - 36º
	Limo	17 – 20	25 – 32º
	Arcilla	15 – 22	16º – 28º
Rellenos	Tierra vegetal	17	25º
	Terraplén	17	30º
	Pedraplén	18	40º

Rango de valores de ϕ según el CTE. DB-SE-Cimientos

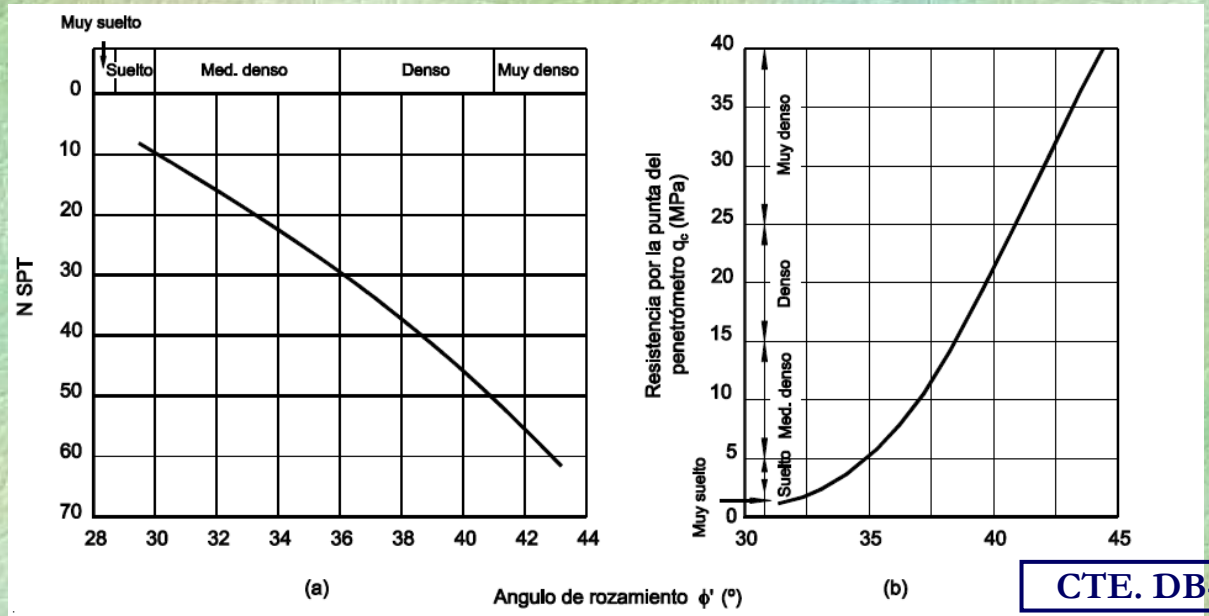


Figura D.1. Correlación entre los ensayos SPT y CPT con el ángulo de rozamiento interno efectivo en suelos granulares

CTE. DB-SE-Cimientos

TEMA 6. CALCULO DE LA RESISTENCIA EN SUELOS.

Valores de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno (II)

Tabla D.3. Consistencia de las arcillas

Clasificación	I_C	Resistencia a compresión simple q_u (kPa)
Muy blanda	0 - 0'25	0-25
Blanda	0'25 - 0'50	25-50
Media	0'50 - 0'75	50-100
Firme	0'75 - 1	100-200
Muy firme	1 – 1'5	200-400
Dura	> 1'5	> 400

CTE. DB-SE-Cimientos

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT}, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	N_{SPT}	q_u (kN/m^2)	E (MN/m^2)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 – 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 – 100
Suelos compactos o duros	50 – Rechazo	300 - 500	100 – 500
Rocas blandas	Rechazo	500 – 5.000	500 – 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 – 40.000	8.000 – 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000