

Julio 1998

TÍTULO

Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial

Determination of strength parameters of a soil in triaxial set apparatus.

Détermination des paramètres de résistance d'un sol avec l'équipement pour l'essai triaxial.

CORRESPONDENCIA

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 103 *Geotecnia* cuya Secretaría desempeña MINISTERIO DE FOMENTO.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 29326:1998

©AENOR 1998
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

40 Páginas

Grupo 20

ÍNDICE

	Página
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	4
2 NORMAS PARA CONSULTA	4
3 MODALIDADES DE ENSAYO QUE CONTEMPLA ESTA NORMA	4
4 EQUIPO Y MATERIAL NECESARIOS	4
4.1 Célula triaxial	5
4.2 Membrana	5
4.3 Placas porosas	6
4.4 Bandas de papel de filtro	6
4.5 Sistemas para aplicación de las presiones	6
4.6 Prensa	7
4.7 Dispositivos de medida	7
4.8 Aparatos y material vario	8
5 PREPARACIÓN DE LA PROBETA	8
5.1 Aspectos generales	8
5.2 Probetas inalteradas	9
5.3 Probetas remoldeadas	9
5.4 Método operatorio	9
5.5 Medidas iniciales de las probetas	10
6 PREPARACIÓN DEL EQUIPO	10
6.1 Comprobaciones rigurosas	10
6.2 Revisiones de rutina	10
7 MONTAJE DE LA PROBETA EN LA CÉLULA Y PREPARACIÓN PARA EL ENSAYO	11
8 PROCESO DE SATURACIÓN	12
8.1 Consideraciones generales	12
8.2 Método de saturación por incrementos de la presión externa y de la contrapresión	12
8.3 Saturación a humedad constante	13
9 PROCESO DE CONSOLIDACIÓN	14
9.1 Consolidación	14
9.2 Cálculo del tiempo necesario para la rotura	15
10 PROCESO DE ROTURA	17
10.1 Ensayo consolidado, sin drenaje y con medida de presiones intersticiales	17
10.2 Ensayo consolidado, con drenaje y con medida del cambio de volumen	21
10.3 Ensayo no consolidado, con rotura rápida y sin drenaje	24
11 GRÁFICOS Y RESULTADOS	25
12 INFORME DEL ENSAYO	26
13 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS	26

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma tiene por objeto la determinación de las relaciones tensión-deformación, los parámetros resistentes cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno, ϕ , y las trayectorias de tensiones totales y efectivas de un suelo sometido a una presión externa¹⁾, es decir a una presión igual en todas las direcciones que se aplica a la muestra envuelta en una membrana de goma por medio del fluido que le rodea.

Normalmente el ensayo se realiza sobre tres probetas de un mismo suelo, saturadas, sometidas cada una de ellas a una tensión efectiva diferente.

2 NORMAS PARA CONSULTA

UNE 103300 – *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.*

UNE 103400 – *Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.*

UNE 103405 – *Geotecnia. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.*

3 MODALIDADES DE ENSAYO QUE CONTEMPLA ESTA NORMA

Para determinar las relaciones tensión-deformación, los parámetros resistentes cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno, ϕ , y las trayectorias de tensiones totales y efectivas de un suelo inalterado o remoldeado, se utiliza un equipo triaxial en donde una probeta de suelo de forma cilíndrica, sometida a una presión externa, se rompe a compresión.

Se pueden efectuar los siguientes tipos de ensayos:

- **Ensayo consolidado, sin drenaje y con medida de presiones intersticiales (CU).** Una vez que la probeta se satura y se consolida en condiciones isotropas, se procede a la rotura a compresión a la velocidad adecuada para que se uniformice la presión intersticial en toda la probeta, midiéndose su evolución durante todo el proceso. De este ensayo se pueden obtener los parámetros resistentes en tensiones totales y efectivas, c_{cu} , ϕ_{cu} y c' y ϕ' .
- **Ensayo consolidado, con drenaje y con medida del cambio de volumen (CD).** Una vez que la probeta se satura y se consolida en condiciones isotropas, se procede a la rotura a compresión a la velocidad adecuada para que no se produzcan incrementos de presión intersticial, midiendo el volumen de agua tomada o expulsada por la probeta. De este ensayo se pueden obtener los parámetros resistentes en tensiones efectivas, c' y ϕ' .
- **Ensayo no consolidado con rotura rápida y sin drenaje (UU).** Nada más aplicar la presión externa, se procede a la rotura a compresión en condiciones no drenadas. De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes en tensiones totales, c_u y ϕ_u .

4 EQUIPO Y MATERIAL NECESARIOS

La sala donde se realice el ensayo no debe sufrir fluctuaciones de temperatura superiores a $\pm 2^\circ\text{C}$ y los equipos deben estar protegidos de la luz solar directa, de fuentes de calor, de corrientes de aire y de vibraciones.

El equipo necesario para la realización de este ensayo está constituido por las siguientes componentes:

1) Frecuentemente se suelen utilizar los términos "presión lateral" y "presión de confinamiento" en lugar del de "presión externa". No obstante, en esta norma se ha preferido el empleo de este último.

4.1. Célula Triaxial

En la figura 1 se incluye un esquema típico de la célula triaxial preparada para la ejecución de un ensayo.

La célula debe tener la resistencia adecuada para soportar, como mínimo, una presión interna de 1 200 kPa¹⁾.

El cojinete de guía por el que discurre el pistón de carga y sale al exterior de la cámara de la célula, debe permitir el libre movimiento del pistón y asegurar su verticalidad. La unión entre éste y la cabeza de apoyo sobre la probeta debe evitar que se produzcan inclinaciones de dicha cabeza y desplazamientos horizontales de la misma. Este conjunto de elementos no debe dar lugar a un error en la medida de la carga aplicada sobre la probeta que sea superior a $\pm 0,75$ N.

Si la medida de la carga vertical sobre la probeta se efectúa en el exterior de la cámara de la célula triaxial, se debe comprobar antes de iniciar el ensayo que el pistón discurre libremente por el cojinete, y que el rozamiento se encuentra dentro de los límites admitidos.

Si por el contrario la medida de la carga se hace en el interior de la cámara, directamente sobre la probeta, se debe verificar que el dispositivo utilizado es suficientemente insensible a la presión externa y a esfuerzos laterales.

Tanto la cabeza de apoyo sobre la probeta como el pedestal sobre el que ésta descansa, deben ser de un material cuyas deformaciones sean despreciables comparadas con las de la probeta. Además deben tener un diámetro igual que aquélla.

La fuerza sobre la probeta debida al peso del pistón más la cabeza de apoyo, no debe ser superior a 2 N o al 1% de la carga de rotura (se debe tomar el mayor valor).

Las llaves situadas en la base de la célula no deben producir al abrirlas o cerrarlas un cambio de presión de más de 0,7 kPa, cuando todo el sistema esté saturado de agua.

Todas las tuberías de conexión utilizadas deben poder soportar sin pérdidas las presiones de trabajo del equipo y se deben verificar antes de montar el ensayo, por si tuvieran alguna obstrucción. Deben tener un coeficiente de expansión debido a la presión interior que no sobrepase los 0,001 mililitros por metro de longitud y por kilopascal de incremento de presión.

4.2 Membrana

La probeta debe estar confinada lateralmente por medio de una membrana elástica que impida que el fluido utilizado para el confinamiento pueda penetrar en su interior. Antes de montar dicha membrana sobre la probeta se debe comprobar que no está perforada, aplicando, mediante un sistema adecuado, una ligera presión de aire en su interior y viendo seguidamente si al sumergirla en agua aparecen burbujas.

En el apartado correspondiente a los cálculos, se indica la forma de calcular las correcciones que se deben aplicar a las tensiones verticales y horizontales para tomar en consideración el efecto de rigidización producido por la membrana y por las bandas de papel de filtro. En cualquier caso, la combinación de ambos efectos no debe dar lugar a una corrección cuyo valor sea superior al 10% del valor de la tensión desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$) en rotura²⁾.

1) 1 kp/cm² = 98,0665 kPa.

2) Frecuentemente se suele utilizar el término "desviador" en lugar del de "tensión desviadora". No obstante, en esta norma se ha preferido el empleo de este último.

Las características de las membranas deben ser:

- El diámetro interior antes de colocarla en la probeta debe ser igual al de ésta o bien ligeramente inferior, pero no menos de $0,95 D$, siendo D el diámetro de la probeta.
- Su espesor no debe ser mayor de $0,01 D$.
- El módulo de elasticidad, medido en tracción, no superior a $1\ 600\text{ kPa}$.
- La longitud debe exceder, como mínimo, a la de la probeta en unos 50 mm .

En los casos de ensayos de larga duración o cuando la probeta contenga partículas angulosas que puedan perforar la membrana, se pueden emplear dos de igual espesor.

Las bandas elásticas que se utilicen para sujetar la membrana al pedestal y a la cabeza superior deben tener las dimensiones y propiedades elásticas adecuadas para asegurar que no pueda penetrar fluido de confinamiento en la probeta.

4.3 Placas porosas

Las placas porosas situadas en los dos extremos de la probeta deben tener el mismo diámetro que ésta y su coeficiente de permeabilidad debe estar entre 10^{-8} m/s y 10^{-4} m/s , en ensayos con probetas de arcillas o limos y ser mayor de 10^{-4} m/s en el caso de materiales granulares.

Las caras no deben tener irregularidades y su deformabilidad bajo carga debe ser despreciable en comparación con la de la probeta.

Se debe verificar periódicamente que las placas porosas no estén ocluidas.

Para su saturación se deben hervir, en agua destilada, durante al menos 10 min , y después mantenerlas sumergidas en agua desaireada hasta el momento de su utilización.

4.4 Bandas de papel de filtro

En el caso de suelos de baja permeabilidad, en el que es aconsejable el uso de bandas de papel de filtro en contacto con las paredes laterales de la probeta con el fin de reducir el camino máximo de drenaje, las bandas deben ser de un material que no se disgregue en agua y cuyo coeficiente de permeabilidad, cuando está sometido a una presión normal de 600 kPa , no sea inferior a 10^{-7} m/s .

La superficie lateral cubierta por las bandas de papel utilizadas no debe en ningún caso ser superior al 50% del total. En el apartado dedicado a los cálculos se indica la forma de determinar la corrección de la tensión principal, σ_1 , debida a las bandas de papel de filtro.

No obstante, en el caso de que solamente se utilicen cuatro bandas, de manera que la suma de la anchura de todas sea inferior al 10% del valor de la longitud de la circunferencia de la sección recta de la probeta, no es necesario efectuar ningún tipo de corrección.

4.5 Sistemas para aplicación de las presiones

Los equipos para aplicación y mantenimiento de la presión externa y de la contrapresión¹⁾, deben ser independientes y mantener constante la presión con un margen de $\pm 0,5\%$ del valor indicado.

1) Frecuentemente se suele utilizar el término "presión en cola" en lugar del de "contrapresión". No obstante en esta norma se ha preferido el empleo de este último.

Dichos sistemas deben incluir como mínimo un medidor de presión debidamente calibrado, para cuantificar la presión externa y la contrapresión. El medidor debe estar permanentemente conectado a los dos sistemas de presión por medio de las llaves adecuadas.

4.6 Prensa

La prensa utilizada debe tener la gama de velocidades adecuada a los diferentes tipos de ensayos, de forma que se mantengan las condiciones indicadas en las definiciones incluidas en el capítulo 3. No obstante se puede considerar que un rango de velocidad desde 2 mm/min hasta 0,001 mm/min es suficiente para la mayoría de los casos.

La velocidad de avance de la prensa no debe diferir del valor seleccionado en más de $\pm 10\%$ de este valor. Además el desplazamiento debe ser continuo sin producir vibraciones.

El recorrido vertical del plato debe ser por lo menos el 30% de la altura de la probeta que se ensaye.

4.7 Dispositivos de medida

Los dispositivos de medida son:

4.7.1 Fuerza. La medida de la fuerza aplicada sobre la probeta se cuantifica por medio de un anillo dinamométrico o de un transductor de fuerza. En el primer caso, tanto la capacidad de carga como la sensibilidad deben ser las adecuadas según las dimensiones y resistencia esperada de la probeta y de acuerdo con las condiciones expuestas en el apartado 4.1; en cuanto al segundo, la sensibilidad de los transductores de fuerza que actualmente existen en el mercado, suelen ser más que suficiente en la mayoría de los casos.

4.7.2 Presiones. Los dispositivos utilizados para medir la presión externa y la contrapresión, deben tener la sensibilidad adecuada para apreciar una diferencia entre ambas presiones de $\pm 2\%$ ó $\pm 0,5$ kPa, dependiendo cual de estos límites sea el mayor en cada caso.

El dispositivo utilizado en la medida de la presión intersticial debe ser suficientemente rígido para que no experimente cambios de volumen apreciables. Los transductores electrónicos de presión cumplen esta condición. Para los demás equipos la condición que deben cumplir es:

$$\frac{\Delta V_T}{V \cdot \Delta U} \leq 5 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{kN}}$$

donde

ΔV_T el cambio de volumen total, constituido por el cambio de volumen producido en los tubos de conexión más el cambio de volumen del propio dispositivo de medida, para un incremento de presión, ΔU ;

V el volumen de la probeta.

Debe disponer de un bloque desaireador con una salida para purga de aire.

4.7.3 Deformación. La deformación vertical de la probeta se determina normalmente midiendo el proceso de avance del pistón de carga, mediante un comparador mecánico o un transductor de desplazamiento fijado al pistón y con la punta del palpador apoyado en un punto fijo de la célula triaxial, según se aprecia en la figura 2.

El dispositivo utilizado debe tener un recorrido superior a un tercio de la altura de la probeta ensayada, y una precisión de 0,01 mm.

4.7.4 Cambio de volumen. Para medir el cambio de volumen de la probeta se puede utilizar o una bureta graduada o un medidor de cambio de volumen de membrana, con transductor de desplazamiento asociado.

El sistema utilizado debe permitir la medida de la cantidad de agua que entra o sale de la probeta con una precisión de $\pm 0,2\%$ del volumen inicial de ésta. Además, la precisión del equipo de medida debe ser $\pm 0,05\%$ del mencionado volumen inicial.

4.8 Aparatos y material vario

Como material vario se debe tener el siguiente:

- Cámara húmeda con dispositivo de regulación y control de la temperatura y humedad.
- Recinto climatizado para el tallaje de las probetas.
- Extractor de muestras motorizado, similar al descrito en la Norma UNE 103400.
- Calibre o pie de rey, de precisión 0,1 mm.
- Balanzas de capacidad y precisión adecuadas.
- Talladores de diversos diámetros, con sus accesorios adecuados (sierras de alambre, espátulas, cuchillos, etc.).
- Moldes y mazas de compactación para remoldear probetas de diferentes diámetros.
- Equipo y material adecuado para determinar la humedad según la Norma UNE 103300.
- Aceite de ricino para el pistón lapeado.
- Agua destilada y agua desaireada en cantidad suficiente.
- Succionador para introducir la probeta en la membrana.
- Papel de filtro.
- Dispositivo para verificar la verticalidad de la probeta en el pedestal.

5 PREPARACIÓN DE LA PROBETA

Las probetas para el ensayo se pueden preparar por diferentes procedimientos, a partir de la muestra de suelo que se disponga.

En todos ellos se debe operar en ambientes que tengan una humedad relativa no inferior al 50%. En el caso de suelos sensibles a los cambios de humedad, es necesario tallar en cámara húmeda o recinto análogo que tenga una humedad relativa del $90\% \pm 5\%$.

5.1 Aspectos generales

Las probetas deben ser de forma cilíndrica con un diámetro no inferior a 35 mm y un altura entre 1,85 y 2,25 veces su diámetro.

El diámetro de la probeta debe ser mayor que cinco veces el tamaño máximo de las partículas¹⁾.

Las caras circulares deben estar planas y ser perpendiculares al eje vertical de la probeta, no debiendo existir entre éste y la cara circular un ángulo superior a $\pm 0,6^\circ$. Todos los surcos y orificios que queden en dichas caras, caso de no poder ser eliminados durante el refrentado, deben rellenarse con el material sobrante.

1) Normalmente se utilizan probetas con diámetros de 38,1 mm, 50,8 mm y 101,6 mm (1 ½", 2" y 4" respectivamente).

5.2 Probetas inalteradas

Cuando se trate de muestras inalteradas se deben manejar con cuidado para no alterar la estructura del suelo y su contenido de humedad. El procedimiento operatorio depende de que el diámetro de la probeta a preparar sea igual o menor que el del tubo portamuestras o de que la muestra se encuentre en forma de bloque parafinado.

Durante la extracción de la muestra se debe inspeccionar el estado en que ésta se encuentra, observando si existen zonas blandas, perturbaciones, partículas de mayor tamaño que la quinta parte del diámetro de la probeta, etc., rechazando dicha muestra cuando tales anomalías impidan la preparación de tres probetas como mínimo.

5.3 Probetas remoldeadas

En el caso de probetas remoldeadas se pueden emplear dos procedimientos para su preparación:

- a) Compactar el material en un molde adecuado, con una energía de compactación y una humedad determinadas.
- b) Compactar el material en un molde adecuado, con una humedad determinada y variando la energía de compactación con la finalidad de alcanzar una cierta densidad seca.

5.4 Método operatorio

A continuación se describen los métodos para preparar las probetas en función de la muestra que procedan.

5.4.1 Muestras inalteradas. Cuando la muestra se encuentra en tubo portamuestras del mismo diámetro que la probeta a preparar, comprobar que el recubrimiento del extremo inferior del tubo es razonablemente plano y perpendicular al eje del mismo. En caso contrario, se debe eliminar toda la parafina y refrentar el extremo de la muestra para conseguir dicha condición.

Antes de proceder a la extracción de la muestra por el procedimiento de extrusión es conveniente verificar que dicho procedimiento no va a producir una importante alteración de su estructura. En tal caso se debe cortar el tubo portamuestras en trozos más pequeños, de una longitud ligeramente mayor que la altura de la probeta a preparar.

Si por el contrario se puede proceder a la extracción del material sin alterar sensiblemente su estructura, se aplica una ligera película de aceite al pistón del extractor, se fija el tubo y se coloca en el extremo opuesto la cuna del extractor para la recepción de la muestra. Se acciona aquél hasta que se extraiga del tubo una longitud de muestra ligeramente mayor que la altura de la probeta a preparar. Se cortan y se refrentan las bases de manera que la altura de las probetas sea la especificada.

Cuando la muestra esté en un tubo de mayor diámetro que el de la probeta a preparar, se comprueba en primer lugar que el método de extrusión no altera sensiblemente la estructura del material. En este caso se procede a la extracción del material fijando el tubo en el extractor y accionando el pistón hasta que se extraiga una longitud ligeramente mayor que la altura de la probeta. Se corta y se procede al tallado de una o varias probetas dependiendo de la relación entre los diámetros de la muestra y de la probeta.

Si el diámetro de la muestra es suficiente, se deben tallar las tres probetas de la porción de muestra extraída, ya que de esta forma se asegura que todas ellas corresponden al mismo nivel.

Si el proceso de extrusión puede alterar sensiblemente la estructura del material, se debe cortar el tubo portamuestras bien longitudinalmente extrayendo la muestra entera o bien en trozos más pequeños con una longitud ligeramente mayor que la altura de la probeta. Se talla seguidamente las probetas para el ensayo.

En el caso en que la muestra se encuentre en forma de bloque parafinado, se retira el recubrimiento en la zona en la que se vaya a proceder a preparar las probetas y se corta un trozo que permita tallar éstas. Se debe realizar el proceso de tallado de manera que el eje longitudinal de las probetas coincida con la disposición vertical del suelo en el terreno donde se tomó el bloque.

5.4.2 Muestras remoldeadas. Para la preparación de probetas remoldeadas se puede proceder de dos formas diferentes:

- a) Compactando el material en un molde de mayor diámetro que el de la probeta, tallando ésta seguidamente.
- b) Compactando directamente la probeta en un molde tripartido de las mismas dimensiones de aquélla.

En ambos casos se debe emplear uno de los criterios de compactación referido en el apartado 5.3.

En el caso de suelos arenosos, el proceso de compactación se realiza directamente sobre el pedestal de la base de la célula, utilizando un molde adecuado que permita situar en su interior la membrana y aplicar el vacío para que ésta se mantenga en contacto con la pared interior del molde durante el proceso de compactación. También se puede utilizar, según el caso, un procedimiento en el que una vez compactado el material en el molde adecuado con la humedad deseada, se congela para facilitar la colocación posterior de la membrana, según se especifica en el capítulo 7.

5.5 Medidas iniciales de las probetas

Una vez preparadas las probetas por cualquiera de los procedimientos anteriormente descritos, se miden inmediatamente el diámetro, la altura y la masa inicial.

La medida del diámetro se debe hacer mediante el calibre, en tres secciones rectas igualmente espaciadas a lo largo de la altura de la probeta, tomando en cada una de aquéllas por lo menos dos medidas a 90°, girando para ello la probeta adecuadamente. El diámetro medio inicial, d_i , es el valor medio de todas las medidas efectuadas, expresado en milímetros.

El valor de la altura inicial, L_o , se obtiene análogamente como el valor medio de tres determinaciones efectuadas en diferentes posiciones, separadas unos 120° aproximadamente, expresándola en milímetros.

La masa inicial de la probeta, m_o , expresada en gramos se debe determinar con una precisión del 0,1% o bien de décima de gramo.

Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 5.

6 PREPARACIÓN DEL EQUIPO

El equipo triaxial debe estar sometido a comprobaciones rigurosas y revisiones de rutina, a fin de asegurar su correcto funcionamiento. Las primeras se deben realizar periódicamente¹⁾, mientras que las segundas se deben efectuar cada vez que se realice un ensayo.

6.1 Comprobaciones rigurosas

Dentro de éstas se encuentran la célula triaxial, la prensa, el sistema de presión externa y de contrapresión, el equipo para medida de las presiones intersticiales, el equipo para medida del cambio de volumen y los dispositivos para medida de la fuerza, la presión y el desplazamiento. En el contexto de estas comprobaciones se debe incluir las calibraciones de dichos dispositivos de medida.

6.2 Revisiones de rutina

Se deben efectuar antes de montar la probeta para la realización del ensayo.

1) Una práctica aconsejable puede ser efectuar estas comprobaciones dos veces al año, o cuando se ha cambiado algún componente importante.

6.2.1 Equipo de presión externa. Dependiendo del equipo concreto del que se disponga, comprobar que no tiene fugas, que el indicador de la presión seleccionada marca el valor correcto y que dispone de agua desaireada suficiente para la realización del ensayo.

6.2.2 Equipo de contrapresión. Se debe verificar el estado del equipo de presión igual que en el apartado anterior. Se llenan de agua todos los conductos de la base de la célula y el bloque desaireador, y se asegura de que no quede aire atrapado en la cámara en que está conectado el transductor de presión (se debe utilizar la llave de descarga y el tornillo de purga del bloque desaireador).

6.2.3 Equipo de medida de cambio de volumen. Se comprueban las conexiones por si tuvieran alguna fuga, y que todos los conductos de conexión a la base de la célula están llenos de agua desaireada. Se comprueba que el sistema de medida de cambio de volumen está al máximo de su capacidad al iniciar el ensayo.

Se cierra la llave de conexión de éste sistema a la base de la célula triaxial y se aplica la máxima presión compatible con el equipo que se utilice, a fin de comprobar que no hay fugas.

7 MONTAJE DE LA PROBETA EN LA CÉLULA Y PREPARACIÓN PARA EL ENSAYO

Se hace fluir un poco de agua por la salida de la contrapresión situada en el centro del pedestal. Se coloca una placa porosa saturada sobre éste, eliminando toda el agua sobrante y procurando no dejar burbujas de aire atrapadas.

Si se utilizan bandas de papel de filtro laterales, se deben colocar sobre la placa porosa inferior¹⁾.

Se coloca rápidamente la probeta, o sobre la placa porosa, o sobre los extremos de las bandas de papel de filtro si se hubiesen dispuestos éstas, procurando, en cualquier caso, no dejar aire ocluido.

Si se han empleado bandas de papel de filtro, se deben situar éstas sobre la superficie lateral y la base superior de la probeta procurando que no quede atrapada ninguna burbuja de aire.

Se coloca otra placa porosa sobre la probeta, eliminado previamente toda el agua en exceso que tenga aquélla.

Se coloca la membrana sobre la probeta por medio del succionador y se sella el extremo sobre el pedestal por medio de las bandas elásticas o juntas tóricas.

Si la cabeza de apoyo superior lleva conexión para drenaje, se debe tener la precaución de introducir, previamente a su colocación sobre la probeta, las bandas elásticas o juntas tóricas dejándolas en el tubo de conexión.

A continuación, se deja fluir un poco de agua de manera que queden llenos los conductos internos de esta cabeza superior y colocarla sobre la placa porosa superior sin que queden burbujas de aire. Se sitúa la membrana sobre los laterales de la cabeza sellándola con las bandas elásticas o juntas tóricas dejadas anteriormente sobre el tubo de conexión.

Se debe asegurar la verticalidad de la probeta sobre el pedestal y que el tubo de conexión con la cabeza superior no interfiere con el montaje de la camisa lateral de la célula.

Se monta el resto de la célula triaxial procurando que el pistón quede suficientemente alejado de su punto de apoyo sobre la cabeza superior. Se comprueba la verticalidad de la probeta haciendo bajar lentamente el pistón hasta que toque ligeramente sobre la cabeza y se retira a continuación, fijándolo. Se corrige cualquier falta de verticalidad que se pudiera observar.

1) En el ensayo no consolidado no drenado (UU) no es necesaria la utilización de placas porosas ni bandas de papel.

Se llena la célula con agua desaireada, dejando salir el aire por el tapón de purga situado en la cabeza de la célula. Se pone finalmente una pequeña cantidad de aceite de ricino en la parte superior a fin de evitar fugas por el cojine- te del pistón.

Se cierra el tapón de purga antes de aplicar la primera presión externa para iniciar el proceso de saturación.

8 PROCESO DE SATURACIÓN

El proceso de saturación de la probeta tiene por finalidad asegurar que todos los poros de ésta quedan llenos de agua, permitiendo la correcta medida de las presiones intersticiales.

8.1 Consideraciones generales

A efectos de esta norma se describen dos procedimientos de saturación:

- Método de saturación por incrementos de la presión externa y de la contrapresión.
- Método de saturación a humedad constante.

El primero consiste en aplicar una contrapresión que asegure que elimine todo el aire originalmente en los poros, a la par que se aumenta la presión externa de manera que en todo momento se tenga una presión efectiva positiva pequeña.

El segundo consiste en incrementar progresivamente la presión externa sin que entre o salga agua de la probeta.

En cualquiera de los dos casos se deben cumplir siempre las siguientes condiciones:

- a) si se aplica una contrapresión se debe hacer con agua desaireada preparada recientemente;
- b) el valor de los incrementos de presión externa nunca debe ser superior a 50 kPa o al valor de la presión efectiva con que se desea consolidar la probeta, dependiendo de cual de los dos valores es el menor. Normalmente se utiliza este valor de incremento de presión hasta alcanzar un valor del coeficiente B (véase 8.2) de 0,8, cambiando a 100 kPa a partir de este momento hasta alcanzar un valor del coeficiente B igual o superior a 0,95;

NOTA – Evidentemente estos valores solamente se pueden utilizar cuando la presión efectiva de consolidación que vaya a utilizarse sea superior a este último valor.

- c) cuando se trate de un suelo con tendencia a hinchar la presión efectiva resultante en cada escalón no debe ser inferior a la necesaria para impedir el hinchamiento de la probeta;
- d) la diferencia entre la presión externa y la contrapresión no debe ser nunca superior a la presión efectiva de consolidación que vaya a aplicarse o a 20 kPa, dependiendo de cual de estos valores sea el menor. Tampoco deberá ser nunca inferior a 5 kPa.

NOTA – Se ha comprobado que una diferencia entre ambas presiones de 10 kPa es adecuada en la mayoría de los suelos que no presenten una tendencia a hinchar. En estos últimos dicha diferencia no debe ser inferior a la presión efectiva necesaria para impedir el hinchamiento.

8.2 Método de saturación por incrementos de la presión externa y de la contrapresión

El procedimiento operatorio es el siguiente:

Se comprueba que la llave o llaves de entrada y salida de agua de la probeta (según se utilice conexión por un extremo de la probeta o por ambos) están cerradas.

A continuación se abre la llave de conexión del transductor de presión intersticial a la probeta y acto seguido se aplica el primer escalón de presión externa ($\delta\sigma_3$). Se observa la evolución de la presión intersticial (δu) hasta que se equilibra y se calcula el coeficiente B mediante la expresión:

$$B = \delta u / \delta \sigma_3$$

donde

δu el incremento de presión intersticial producido;

$\delta\sigma_3$ el valor del último escalón de presión externa aplicado (normalmente 50 kPa).

Si el valor de B es igual o superior a 0,95 se puede considerar saturada la probeta. En caso contrario se continua el proceso.

Si al aplicar la presión externa se observa que tras un aumento inicial de la presión intersticial se produce una disminución en el tiempo, se aplica directamente el siguiente escalón de presión externa.

Para continuar el proceso se debe abrir la llave que comunica la probeta con el sistema de contrapresión, aplicando un valor de esta presión inferior a la externa en unos 10 kPa. Se cierra esta llave.

Se anota el valor de la presión intersticial y se aplica el siguiente escalón de la presión externa, volviéndose a calcular el coeficiente B.

Se repiten estas operaciones hasta conseguir un valor del coeficiente B igual o superior a 0,95.

En el caso de que durante el proceso de saturación se desee conocer el volumen de agua que ha tomado la muestra, se debe intercalar un sistema de cambio de volumen en la línea de conexión de la probeta con el sistema de contrapresión. En tal caso se deben medir los incrementos de volumen de agua que ha entrado en la probeta para cada uno de los escalones de contrapresión. El volumen total de agua tomada por la probeta durante el proceso de saturación es la suma de dichos incrementos. (Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 6).

Al finalizar el proceso de saturación se debe comprobar que todas las llaves del equipo están cerradas.

En algunas arcillas fisuradas muy duras y en materiales con estructura muy rígida, es imposible alcanzar esta situación. En tal caso, se considera que la probeta está saturada cuando se alcanza un valor de coeficiente B de 0,90 y este se mantiene constante durante tres incrementos sucesivos de ambas presiones.

8.3 Saturación a humedad constante

En este caso no se permite que entre o salga agua de la probeta, consiguiéndose la saturación de ésta solamente mediante un aumento de la presión externa. Se debe proceder como se indica a continuación.

Se comprueba que están cerradas las llaves de comunicación del sistema de contrapresión con la probeta, y abierta la de conexión con el transductor de presión intersticial, aplicando acto seguido una presión externa de 50 kPa o 100 kPa.

Se espera hasta que se estabilice la lectura del transductor de presión y cuando se logra se calcula el coeficiente B. Si es igual o superior a 0,95 se puede dar por finalizado el proceso de saturación. En caso contrario se incrementa la presión externa hasta que el coeficiente B sea igual o superior a dicho valor.

9 PROCESO DE CONSOLIDACIÓN

El proceso de consolidación que se describe en esta ensayo es isótropo y se debe realizar inmediatamente después de la saturación. Con él, se pretende llevar a la probeta al estado de tensiones efectivas deseado antes de comenzar la rotura. Adicionalmente, los datos que se obtienen durante la etapa de consolidación permiten estimar la velocidad de deformación adecuada durante la fase de rotura y calcular las dimensiones de la probeta justo antes de iniciarse dicho proceso.

Normalmente la tensión efectiva a la que está sometida la probeta al finalizar la etapa de saturación no es la que debe tener al inicio del proceso de rotura. Por consiguiente, es necesario, aumentar la presión externa, reducir la contrapresión o fijar una combinación de ambas.

Si la presión intersticial al final de la etapa de saturación es u_s y la presión efectiva deseada σ_3' , la presión externa debe ser:

$$\sigma_3 = \sigma_3' + u_s$$

En el caso en que esta σ_3 calculada sea mayor que la presión máxima de trabajo de la célula utilizada, la contrapresión, u_b , que se debe aplicar será inferior a u_s y se determina mediante la expresión:

$$u_b = \sigma_{3\text{máx}} - \sigma_3'$$

NOTA – Se debe prestar atención a la posibilidad de que al disminuir la contrapresión, la descompresión del agua de los poros permita la aparición de parte del aire previamente disuelto durante el proceso de consolidación.

9.1 Consolidación

Una vez finalizado el proceso de saturación se debe comprobar que todas las llaves del equipo están cerradas.

Se intercala un sistema de medida de cambio de volumen en la línea que comunica el interior de la probeta con el sistema de contrapresión.

Se ajusta el valor de la presión externa σ_3 (calculado como se indicó con anterioridad) en el correspondiente equipo de presión y se ajusta la contrapresión de manera que la diferencia sea la tensión efectiva que se desea tener. Se pone el cronómetro a cero.

Se abre la llave de comunicación de la presión externa y a continuación la de la contrapresión y la del transductor de presión intersticial. Se anotan las lecturas de la presión intersticial y del cambio de volumen, una vez que se hayan equilibrado. Estos valores se toman como valores iniciales para el proceso de consolidación.

Se abre la llave que comunica la contrapresión y a la par se pone en funcionamiento el cronómetro.

Se anotan las lecturas de la presión intersticial y del cambio de volumen a intervalos de tiempo adecuados¹⁾.

Véanse los modelos de impreso que se muestran en las figura 7 y 8.

Se representan gráficamente los valores del cambio de volumen en función de la raíz cuadrada del tiempo y los de disipación de presión intersticial en función del logaritmo del tiempo.

Se puede considerar finalizado el proceso de consolidación cuando se ha alcanzado un 95% de disipación de la presión intersticial o cuando se estabiliza la lectura del medidor de cambio de volumen.

1) Pueden servir de referencia los intervalos de tiempo utilizados para medir las deformaciones en el ensayo edométrico, UNE 103405.

Finalizado el proceso, se cierra la llave que comunica la contrapresión con la probeta y se mantiene abierta la de la presión externa.

Si en este momento la presión intersticial es u_1 y la externa σ_3 , la presión efectiva es:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

donde $u = 2/3 u_1 + 1/3 u_b$

En el caso en que la diferencia entre la presión intersticial, u_1 , y la contrapresión, u_b , sea muy pequeña, se puede tomar como:

$$u = 1/2 (u_1 + u_b)$$

9.2 Cálculo del tiempo necesario para la rotura

Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 8.

En general, cualquiera que sea el tipo de ensayo triaxial que se vaya a realizar, se calcula primeramente el valor de t_{100} mediante el siguiente procedimiento:

Se representan los valores del cambio de volumen en función de la raíz cuadrada del tiempo.

Se traza la recta que mejor se ajuste a la parte inicial de la función así obtenida y se prolonga hasta que corte a la horizontal trazada por el valor que corresponde al 100% de consolidación. La abscisa de este punto corresponde a $\sqrt{t_{100}}$, calculando seguidamente el valor de t_{100} . (Véase figura 8).

9.2.1 Cálculo de las dimensiones de la probeta al final del proceso de consolidación. Las dimensiones de la probeta al final del proceso de consolidación se calculan mediante las expresiones:

$$a) V_c = V_o - \Delta V_c$$

$$b) A_c = A_o \left[1 - \frac{2}{3} \frac{\Delta V_c}{V_o} \right]$$

$$c) L_c = L_o \left[1 - \frac{1}{3} \frac{\Delta V_c}{V_o} \right]$$

donde

V_c el volumen una vez finalizado el proceso de consolidación, en centímetros cúbicos;

V_o el volumen inicial de la probeta, en centímetros cúbicos;

ΔV_c el cambio de volumen producido durante la consolidación y medido por medio del equipo de cambio de volumen, expresado en centímetros cúbicos;

A_c el área de la sección recta de la probeta una vez finalizado el proceso de consolidación, expresada en milímetros cuadrados;

A_o el área de la sección recta inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados;

L_c la altura de la probeta una vez finalizado el proceso de consolidación, expresada en milímetros;

L_o la altura inicial de la probeta, expresada en milímetros.

9.2.2 Cálculo de la velocidad de rotura en el ensayo consolidado y sin drenaje. El tiempo necesario para alcanzar la rotura, t_f , se determina partiendo de los datos obtenidos durante el proceso de consolidación, como se indica a continuación:

Si no se utilizan en la probeta tiras laterales de papel de filtro:

a) Drenaje por una cara

$$t_f = 0,53 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

b) Drenaje por ambas caras

$$t_f = 2,1 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

Si se utilizan tiras de papel de filtro:

a) Drenaje por una cara

$$t_f = 1,8 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

b) Drenaje por ambas caras

$$t_f = 2,3 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

Si el valor calculado anteriormente para t_f es inferior a 120 min, se toma un tiempo de rotura no inferior a 2 h.

Se calcula la velocidad que se debe aplicar mediante la expresión:

$$v = \frac{\varepsilon_f \cdot L_c}{100 t_f} \quad \text{mm/min}$$

donde

L_c la longitud de la probeta, en milímetros, después del proceso de consolidación¹⁾;

ε_f una estimación del tanto por ciento de deformación en rotura.

9.2.3 Cálculo de la velocidad de rotura en el ensayo consolidado y con drenaje. Se determina el valor de t_{100} de la misma forma que se indica en el apartado 9.2.

Se calcula el tiempo necesario para alcanzar la rotura según se indica a continuación:

Si no se utilizan en la probeta tiras laterales de papel de filtro:

$$t_f = 8,5 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

tanto si el drenaje es por una cara o por ambas.

1) Normalmente se suele tomar como valor L_c , el valor L_0 correspondiente al de la altura inicial de la probeta.

Si se utilizan en la probeta tiras de papel de filtro:

$$t_f = 15 \times t_{100} \quad (t_{100} \text{ expresado en minutos})$$

tanto si el drenaje es por una cara o por ambas.

Si el valor calculado de t_f es inferior a 120 min, se toma un tiempo de rotura no inferior a 2 h.

Se calcula la velocidad que se debe aplicar mediante la expresión:

$$v = \frac{\epsilon_f \cdot L_c}{100 \cdot t_f} \text{ mm/min}$$

donde

L_c la longitud de la probeta, en milímetros, después del proceso de consolidación¹⁾;

ϵ_f una estimación del tanto por ciento de deformación en rotura²⁾.

10 PROCESO DE ROTURA

A continuación se describen los procesos de rotura correspondientes a los distintos tipos de ensayos:

10.1 Ensayo consolidado, sin drenaje y con medida de presiones intersticiales

En este tipo de ensayo, durante la etapa de rotura a compresión de la probeta, se mantiene constante la presión externa de la célula y no se permite el drenaje con lo que no varía el contenido de humedad de la probeta. Durante este proceso se miden los valores de la presión intersticial (normalmente en la base de probeta). La velocidad de deformación aplicada, que se ha calculado previamente como se indica en el apartado 9.2.2, es lo suficientemente lenta para asegurar que este valor de la presión intersticial es prácticamente constante en todo el volumen de la probeta.

Se coloca la célula triaxial sobre el plato de la prensa si los procesos de saturación y consolidación se han realizado fuera de ésta.

Se acciona el plato de la prensa hasta que el pistón de la célula quede a una pequeña distancia de la cabeza de apoyo superior situada sobre la probeta. Se hace una lectura del dispositivo de medida de fuerzas y se anota como valor inicial.

Se ajusta la velocidad de avance del plato de la prensa de manera que sea lo más próxima posible el valor calculado en el apartado 9.2.2, pero siempre por defecto.

Se hacen los ajustes necesarios para que el pistón entre en contacto con la probeta y se comprueba que queda bien alineado para que la carga aplicada lo sea a lo largo del eje vertical de aquélla.

Se sitúa el dispositivo para medida de las deformaciones de manera que tenga disponible un recorrido que sea, al menos, igual al 25 % de la altura de la probeta.

1) Normalmente se suele tomar como valor L_c , el valor L_0 correspondiente al de la altura inicial de la probeta..

2) En ocasiones esta estimación del tanto por ciento de deformación en rotura ϵ_r , puede ser errónea por exceso o por defecto, dando lugar en el primer caso a que se generasen presiones intersticiales positivas, con lo que este ensayo se puede tomar como dato orientativo para seleccionar otro valor de ϵ_r más adecuado.

Se anota la lectura inicial.

Se comprueba que la llave o llaves de conexión a la célula de la contrapresión están cerradas, que la de la presión externa está abierta, y que la que conecta el transductor de presión intersticial está también abierta.

Se anotan en el modelo de impreso que se muestra en la figura 9, los siguientes datos:

- a) Fecha, hora y minutos.
- b) Lectura del dispositivo de medida de deformaciones.
- c) Lectura del dispositivo de medida de la fuerza.
- d) Valor de la presión intersticial.
- e) Valor de la presión externa.

Se ponen en marcha al mismo tiempo, la prensa y el cronómetro. Se toman lecturas de la deformación, la fuerza ejercida sobre la probeta y la presión intersticial a intervalos de 0,2% de deformación hasta alcanzar el 1%, y cada 0,5% de ahí en adelante. En cualquier caso, se deben tener, cuando menos 20, lecturas de las tres variables indicadas antes de alcanzar la rotura.

NOTA 1 – En el caso en que se observe que la fuerza y la presión intersticial varían rápidamente, indicando que se aproxima el punto de rotura, se deben tomar lecturas a intervalos más pequeños.

NOTA 2 – En muestras duras o de materiales rígidos, se puede producir la rotura para deformaciones inferiores a un 1%. En tales casos, si no se dispone de un sistema automático de toma de datos, es conveniente tomar las lecturas a intervalos de carga en lugar de deformación, para poder acumular al menos 20 valores antes de la rotura.

Se continua el ensayo una vez alcanzada la rotura de manera que se pueda asegurar que ésta se ha producido realmente. Si el proceso es de deformación plástica, se detiene el ensayo al alcanzar el 20% de deformación.

Se cierra la llave de conexión de la presión intersticial al transductor de presión y se descarga éste por medio del tapón de purga situado en el bloque desaireador para evitar que trabaje innecesariamente.

Una vez finalizado el proceso de compresión, se debe retirar la célula triaxial de la prensa, para poder así sacar la probeta. Para ello se efectúan las siguientes operaciones:

- Se comprueba que las llaves de conexión de la contrapresión y de la presión intersticial están cerradas.
- Se descarga la fuerza aplicada a la probeta, desplazando hacia abajo el plato de la prensa.
- Se retiran las conexiones de las presiones externa y de la contrapresión.
- Se traslada la célula triaxial a la mesa de trabajo.
- Se descarga la presión externa y se vacía de agua la célula triaxial.
- Se desmonta dicha célula y se retira la probeta de aquélla.
- Se quitan, la cabeza superior, la membrana, las placas porosas y las bandas de papel, si se han utilizado.
- Se hace un esquema de la forma de rotura de la probeta.
- Se determina inmediatamente la masa de la probeta, m_f , con precisión de 0,01 g, y se introduce en estufa a la temperatura adecuada, según el caso, para desecarla, obteniendo así su masa seca, m_d . (En las determinaciones de la humedad se debe consultar la Norma UNE 103300).

Se calculan a partir de los datos obtenidos las siguientes magnitudes (véase el modelo de impreso de la figura 9):

a) Deformación axial

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_c}$$

donde

L_c la altura de la probeta una vez finalizado el proceso de consolidación, expresada en mm. La forma de obtenerla se describe en el apartado 9.2.1;

Δl el cambio de altura experimentado por la probeta, durante el proceso de rotura, medido a partir de la altura inicial y expresado en milímetros.

b) Área de la sección recta de la probeta en la dirección perpendicular al eje¹⁾.

La superficie de dicha sección, correspondiente a cualquier tanto por ciento de deformación, y expresada en milímetros cuadrados es:

$$A_s = \frac{A_c}{1 - \epsilon}$$

donde

A_c el área de la sección recta de la probeta una vez finalizado el proceso de consolidación, expresada en milímetros cuadrados. La forma de obtenerla se describe en el apartado 9.2.1.

c) Fuerza axial, P, aplicada a la probeta.

El valor de dicha fuerza, expresada en N, se determina mediante la expresión:

$$P = (R - R_0) C$$

donde

R_0 la lectura inicial del dispositivo de medida de fuerzas, expresada en divisiones o dígitos;

R la lectura en el momento que se desee, expresada en divisiones o dígitos;

C la constante de calibración del dispositivo de medida de fuerzas, expresada en N por división o dígito.

d) Tensión axial aplicada

La tensión aplicada a la probeta o tensión desviadora, $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ expresada en kPa, se calcula mediante:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_m = \frac{P}{A_s} \times 1\,000$$

1) El cálculo de las secciones se ha realizado considerando que si la probeta está saturada y la rotura es sin drenaje, no se producen variaciones de volumen durante dicha rotura. También se podrían utilizar otros métodos, bien teóricos o bien de medida directa sobre la probeta.

e) Corrección por el efecto de la membrana.

En la figura 3 se incluye la gráfica para obtener la corrección en kPa que se debe aplicar a la tensión calculada, debida al efecto de la membrana. Esta gráfica corresponde al caso más usual de membrana de 38 mm de diámetro interior y 0,2 mm de espesor. En otra situación cualquiera, el valor de la corrección, σ_{mb} , a aplicar se obtiene multiplicando el valor deducido de esta figura por:

$$\frac{38}{D} \cdot \frac{t_m}{0,2}$$

donde

D el diámetro inicial de la probeta, en milímetros;

t_m el espesor total de la membrana (ya que pueden ser varias, una sobre otra), expresado en milímetros.

f) Corrección por el efecto de drenes de papel de filtro

Cuando se utilizan drenes laterales de tiras de papel de filtro, se debe aplicar esta corrección por el efecto de drenes de papel de filtro, σ_{dr} , cuando las deformaciones de la probeta superen el dos por ciento.

En la tabla 1 se incluyen los valores de esta corrección para los diámetros de probeta más usuales. En casos especiales se puede obtener el valor de la corrección por interpolación.

Tabla 1

Valores de la corrección por efecto de los drenes laterales de papel de filtro	
σ_{dr}	
Diámetro de la probeta mm	Valor de la corrección kPa
38	10
50	7
70	5
100	3,5
150	2,5

g) Valor corregido de la tensión desviadora

El valor corregido de la tensión desviadora, $(\sigma_1 - \sigma_3)$, expresado en kPa, se obtiene mediante la expresión:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)_m - \sigma_{mb} - \sigma_{dr}$$

h) Se calcula seguidamente los valores de las tensiones:

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3 \quad \text{en kPa}$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad \text{en kPa}$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad \text{en kPa}$$

siendo u la presión intersticial.

- i) Se calculan los centros y los radios de los correspondientes círculos de Mohr en rotura, en presiones totales y efectivas, mediante las expresiones siguientes:

Presiones totales	Centro $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ Radio $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$
Presiones efectivas	Centro $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$ Radio $(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$

en ambos casos se deben tomar los valores de σ_1 , σ_3 , σ'_1 y σ'_3 correspondientes a la rotura, según el criterio adoptado para definir ésta.

- j) Se calcula el coeficiente de presión intersticial A, mediante la expresión:

$$A = (u - u_0) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

donde

u_0 es la presión intersticial de la probeta al comenzar el proceso de rotura.

- k) En función del método elegido para representar las trayectorias de tensiones se deben calcular los parámetros siguientes:

$$s' = \sigma_1 + \sigma_3 / 2$$

$$t' = \sigma_1 - \sigma_3 / 2$$

en el caso de utilizar el método del Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), o bien

$$p' = \sigma'_1 + 2\sigma'_3 / 3$$

$$q' = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

en el caso de utilizar el método de Cambridge.

10.2 Ensayo consolidado, con drenaje y con medida del cambio de volumen

En este tipo de ensayo, durante la etapa de rotura a compresión de la probeta, se mantiene constante la presión externa de la célula y se permite el drenaje libre a la muestra, aplicando una velocidad de deformación constante calculada según se indica en el apartado 9.2.3. Durante todo el proceso se mide el volumen de agua que entra o sale de la probeta por medio del medidor de cambio de volumen.

Se coloca la célula triaxial sobre el plato de la prensa si es que los procesos de saturación y consolidación se han realizado fuera de ésta.

Se acciona el plato de la prensa hasta que el pistón de la célula quede a una pequeña distancia de la cabeza de apoyo superior situada sobre la probeta. Se hace una lectura del dispositivo de medida de fuerzas y se anota como valor inicial.

Se ajusta la velocidad de avance del plato de la prensa de manera que sea lo más próxima posible al valor calculado en 9.2.3., pero siempre por defecto.

Se hacen los ajustes necesarios para que el pistón entre en contacto con la probeta y se comprueba que queda bien alineado para que la carga aplicada lo sea a lo largo del eje vertical de aquélla.

Se sitúa el dispositivo para medida de las deformaciones de manera que tenga disponible un recorrido que sea, al menos, igual al 25% de la altura de la probeta.

Se anota la lectura inicial.

Se comprueba que las llaves de conexión a la célula de la presión externa y de la contrapresión están abiertas.

Se anotan en el modelo de impreso que se muestra en la figura 10, los siguientes datos:

- a) Fecha, hora y minutos.
- b) Lectura del dispositivo de medida de deformaciones.
- c) Lectura del dispositivo de medida de la fuerza.
- d) Lectura del equipo de medida de cambio de volumen.
- e) Valor de la presión externa.

Se ponen en marcha al mismo tiempo, la prensa y el cronómetro. Se toman lecturas de la deformación, la fuerza aplicada a la probeta y el cambio de volumen a intervalos de 0,2% de deformación hasta alcanzar el 1%, y cada 0,5% de ahí en adelante. En cualquier caso se deben tomar, cuando menos, 20 lecturas de las tres variables indicadas antes de alcanzar la rotura.

NOTA – El procedimiento de ensayo descrito en esta norma, considera que el proceso de rotura de la probeta se realiza con el sistema de contrapresión conectado, bien a través del medidor de cambio de volumen, bien a la cara inferior de la probeta, o bien a la inferior y superior a la vez. En el caso en que se desee observar la evolución de la presión intersticial durante el proceso de rotura, a fin de comprobar que no se produce incremento en dicha magnitud, es necesario conectar el sistema de contrapresión a la cara superior de la probeta y el transductor de presión intersticial a la cara inferior. De esta forma, si se observa un incremento de la presión intersticial con respecto a la contrapresión de más de un 4% del valor de la presión externa, se debe reducir la velocidad de deformación de la probeta.

Se continua el ensayo una vez alcanzada la rotura de manera que se pueda asegurar que se ha producido realmente. Si el proceso fuera del tipo de deformación plástica, se detiene el ensayo cuando se alcanza el 20% de deformación.

Se detiene la prensa y se cierra la llave de conexión de la contrapresión.

Una vez finalizado el proceso de compresión, se deben efectuar las siguientes operaciones:

- Se comprueba que la llave de conexión de la contrapresión está cerrada.
- Se descarga la fuerza aplicada a la probeta desplazando hacia abajo el plato de la prensa.
- Se descarga la presión externa y se vacía de agua la célula triaxial.
- Se desmonta la célula y se retira la probeta.
- Se quita la cabeza superior, la membrana, las placas porosas y las bandas de papel (si es que se han utilizado).
- Se hace un esquema de la forma de rotura de la probeta.
- Se determina inmediatamente la masa de la probeta, m_p , con precisión de 0,01 gramos, y se introduce en estufa a la temperatura adecuada, según el caso, para desecarla y obtener la masa seca m_d .

Se calcula a partir de los datos obtenidos, las siguientes magnitudes (véase el modelo de impreso de la figura 10):

- a) Deformación axial (véase 10.1)
- b) Deformación volumétrica debida al proceso de compresión:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$$

donde

ΔV es el cambio de volumen experimentado por la probeta durante el proceso de compresión; esto es, desde el final de la consolidación hasta el final de la compresión.

- c) Área de la sección recta de la probeta en la dirección perpendicular al eje¹⁾.

La superficie de dicha sección, correspondiente a cualquier tanto por ciento de deformación y expresada en milímetros cuadrados es:

$$A_s = \frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon} A_c$$

donde

A_c es el área de la sección recta de la probeta una vez finalizado el proceso de consolidación, expresada en milímetros cuadrados. La forma de obtenerla se describe en el apartado 9.2.1.

- d) La fuerza axial, P, aplicada a la probeta (véase 10.1).
- e) Tensión axial aplicada (véase 10.1).
- f) Corrección por efecto de la membrana (véase 10.1).
- g) Corrección por el efecto de los drenes de papel de filtro (véase 10.1).
- h) Valor corregido de la tensión desviadora (véase 10.1).
- i) Se calculan seguidamente los valores de las tensiones:

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3 \quad \text{en kPa}$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad \text{en kPa}$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad \text{en kPa}$$

donde u es la presión intersticial.

1) El cálculo de esta sección se ha realizado suponiendo que, durante el proceso de rotura la forma de la probeta se mantiene cilíndrica. Igualmente se podrían utilizar otros criterios, bien teóricos o bien de medida directa sobre la probeta.

j) Se calcula el centro y el radio del círculo de Möhr, mediante las expresiones:

$$\text{Centro } (\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$$

$$\text{Radio } (\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$$

tomando los valores σ'_1 y σ'_3 correspondientes a la rotura según el criterio adoptado para definir ésta.

10.3 Ensayo no consolidado, con rotura rápida y sin drenaje

En este ensayo, una vez finalizado el montaje y sin realizar previamente ni la saturación ni la consolidación de la probeta, se sitúa la célula triaxial en la prensa y se acciona el plato de ésta hasta que el pistón quede a una pequeña distancia de la cabeza de apoyo superior situada sobre la probeta.

Se aplica la presión externa y se comprueba que la llave de conexión de la contrapresión está cerrada.

Se selecciona la velocidad de rotura de manera que esté comprendida entre el uno por ciento y el dos por ciento por minuto de la altura inicial de la probeta, L_0 .

Se hacen los ajustes necesarios para que el pistón de la célula entre en contacto con la probeta y se comprueba que queda bien alineado para que la carga aplicada lo sea a lo largo del eje vertical de aquélla.

Se sitúa el dispositivo para medida de las deformaciones de manera que tenga disponible un recorrido que sea al menos al 25% de la altura de la probeta.

Se anota la lectura inicial.

Se anotan en el modelo de impreso que se muestra en la figura 11, los siguientes datos:

- a) Fecha, hora y minutos.
- b) Lectura del dispositivo de medida de deformaciones.
- c) Lectura del dispositivo de medida de la fuerza.
- d) Valor de la presión externa.

Se ponen en marcha, al mismo tiempo, la prensa y el cronómetro. Se toman lecturas de la deformación y de la fuerza ejercida sobre la probeta a intervalos de 0,2% de deformación hasta alcanzar el 1%, y cada 0,5% de ahí en adelante. En cualquier caso se deben tener, cuando menos, 20 lecturas de las variables indicadas antes de alcanzar la rotura.

NOTA – En muestras duras o de materiales rígidos, se puede producir la rotura para deformaciones inferiores al 1%. En tales casos, si no se dispone de un sistema automático de toma de datos, es conveniente tomar lecturas fijando intervalos de carga en lugar de deformación, para así acumular datos suficientes antes de llegar a la rotura.

Se continua el ensayo una vez alcanzada la rotura de manera que se pueda asegurar que ésta se ha producido realmente. Si el proceso es de deformación plástica, se detiene el ensayo al alcanzar el 20% de deformación.

Una vez finalizado el proceso de rotura se efectuen las siguientes operaciones:

- Se comprueba que las llaves de conexión de la contrapresión y de la presión intersticial están cerradas.
- Se descarga la fuerza aplicada a la probeta, desplazando hacia abajo el plato de la prensa.

- Se desmonta la célula y se retira la probeta.
- Se quita la cabeza superior, la membrana, las placas porosas y las bandas de papel (si es que se han utilizado).
- Se hace un esquema de la forma de rotura de la probeta.
- Se determina inmediatamente la masa de la probeta, m_f , con precisión de 0,01 g, y se introduce en estufa a la temperatura adecuada, según el caso, para desecarla, obteniendo así su masa seca, m_d .

Se calcula a partir de los datos obtenidos las siguientes magnitudes (véase el modelo de impreso de la figura 11):

- a) Deformación axial (véase 10.1).
- b) Área de la sección recta de la probeta en la dirección perpendicular al eje (véase 10.1).
- c) Fuerza axial, P, aplicada a la probeta (véase 10.1).
- d) Tensión axial aplicada (véase 10.1).
- e) Corrección por el efecto de la membrana (véase 10.1).
- f) Corrección por el efecto de drenes de papel de filtro (véase 10.1).
- g) Valor corregido de la tensión desviadora (véase 10.1).
- h) Se calcula seguidamente el valor de la tensión:

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3 \quad \text{en kPa}$$

- i) Se calculan los centros y los radios de los círculos de Möhr en presiones totales, según las expresiones incluidas en 10.1.

11 GRÁFICOS Y RESULTADOS

Se representa de forma gráfica los datos siguientes:

- a) La relación desviador-deformación para cada una de las probetas ensayadas, colocando en abscisas el tanto por ciento de deformación y en ordenadas la tensión desviadora corregida. (Véanse los modelos de impreso que se muestran en las figuras 12 y 13).
- b) En los ensayos consolidados, sin drenaje y con medida de la presión intersticial, la variación de esta magnitud en función de la deformación. Normalmente se representa en abscisas el tanto por ciento de deformación y en ordenadas los valores de la presión intersticial. (Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 12).
- c) En los ensayos consolidados y con drenaje, la variación del volumen en función de la deformación, representando en abscisas el tanto por ciento de deformación y en ordenadas los cambios de volumen. (Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 13).
- d) Los círculos de Möhr correspondientes a la rotura, situando en abscisas los centros de los semicírculos, con los correspondientes radios calculados según se indica con anterioridad (véase figura 4).

La escala utilizada debe ser la misma en ambos ejes. (Véase el modelo de impreso que se muestra en la figura 14).

12 INFORME DEL ENSAYO

En el informe del ensayo final se deben incluir los resultados y datos considerados en los modelos de impreso de las figuras 12 y 13 (según se trate de un ensayo sin drenaje y con medida de la presión intersticial, o con drenaje y medida del cambio del volumen) y en el modelo de impreso de la figura 14.

Los demás modelos de impreso se utilizan durante la ejecución del ensayo y la elaboración de los datos, pero no se incluyen en el informe final.

13 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

Esta norma concuerda esencialmente con:

BS 1377: Part 7 y 8:1990.

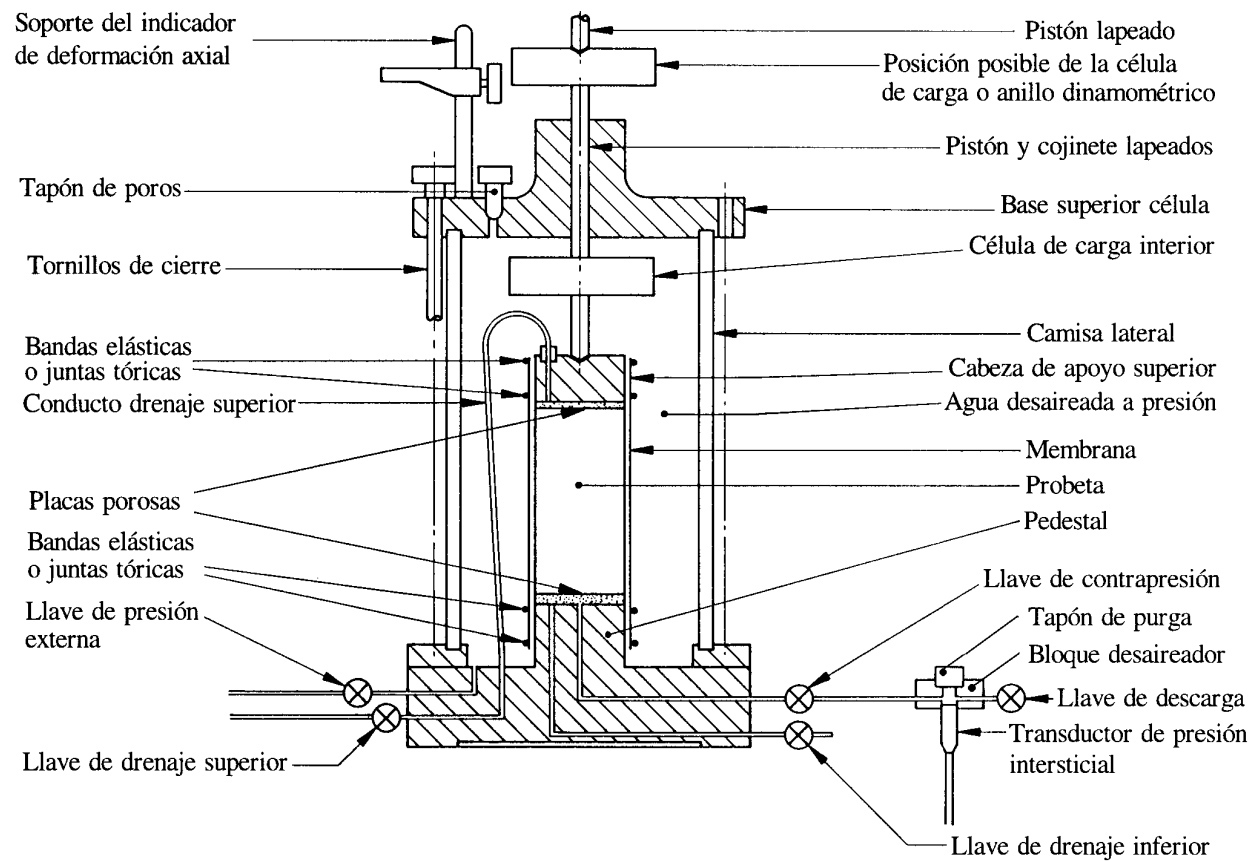


Fig. 1 – Célula triaxial

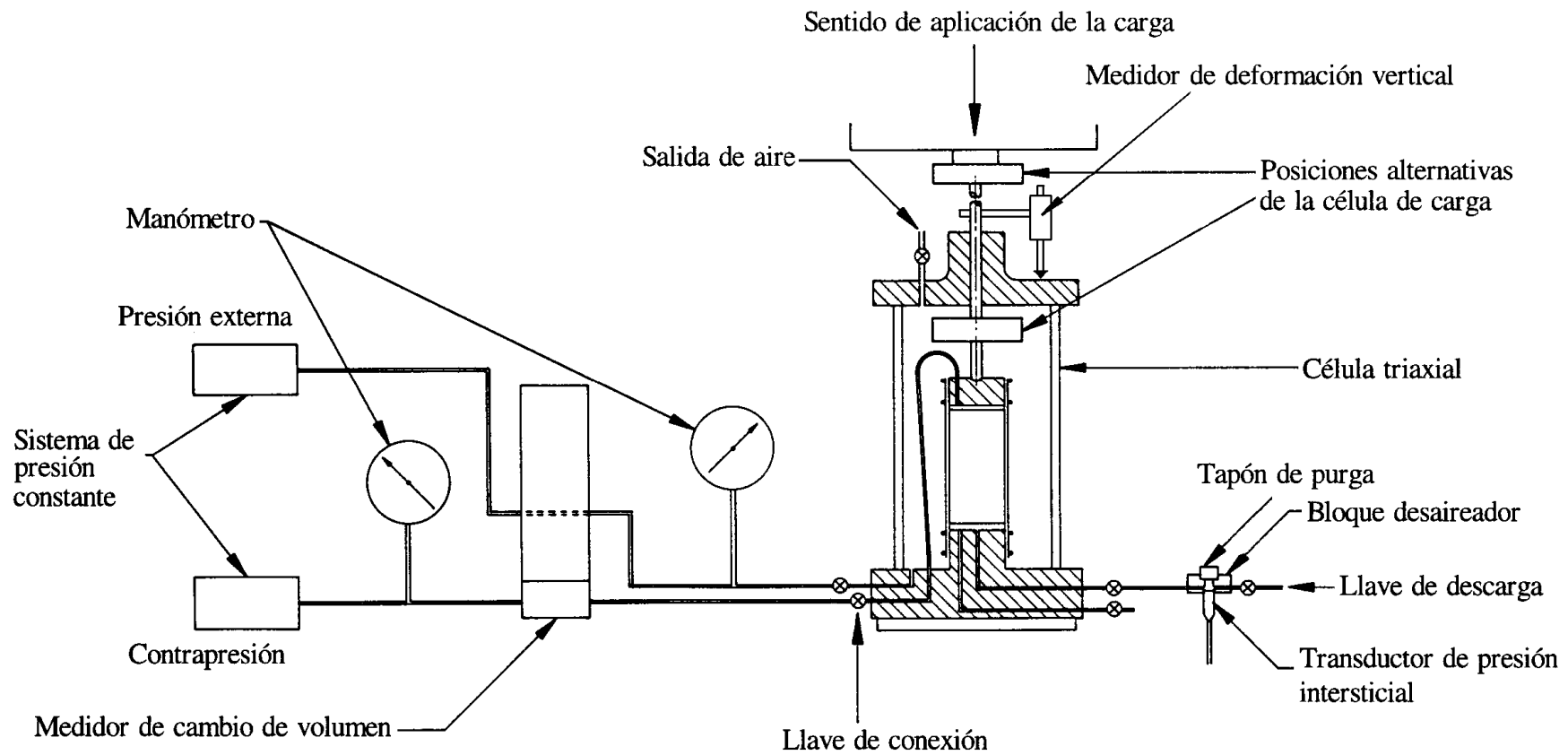


Fig. 2 – Disposición general de los aparatos en el ensayo triaxial

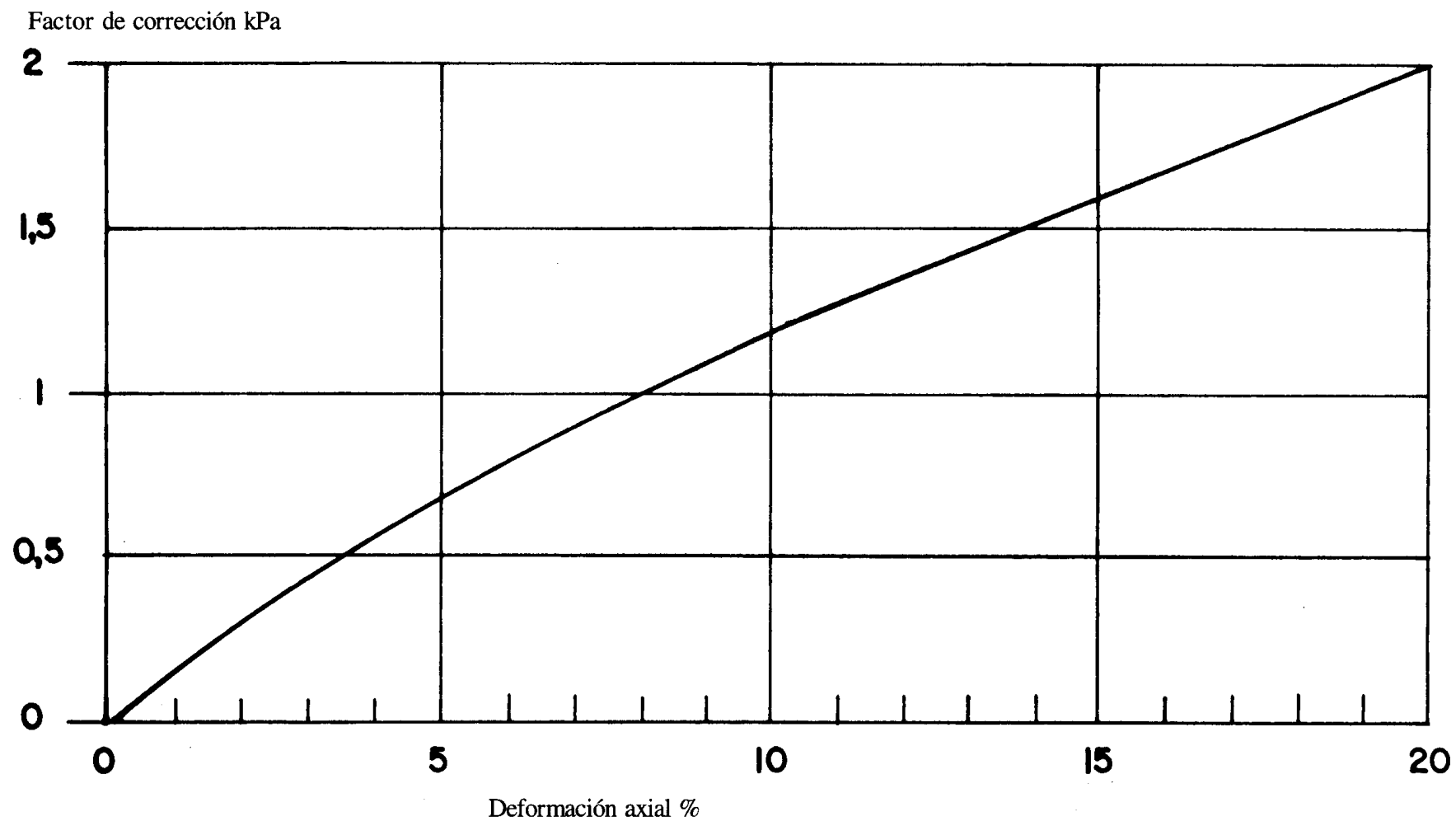


Fig. 3 – Curva para la corrección por efecto de la membrana para probetas de 38 mm de diámetro y espesor de membrana de 0,2 mm (efecto barril)

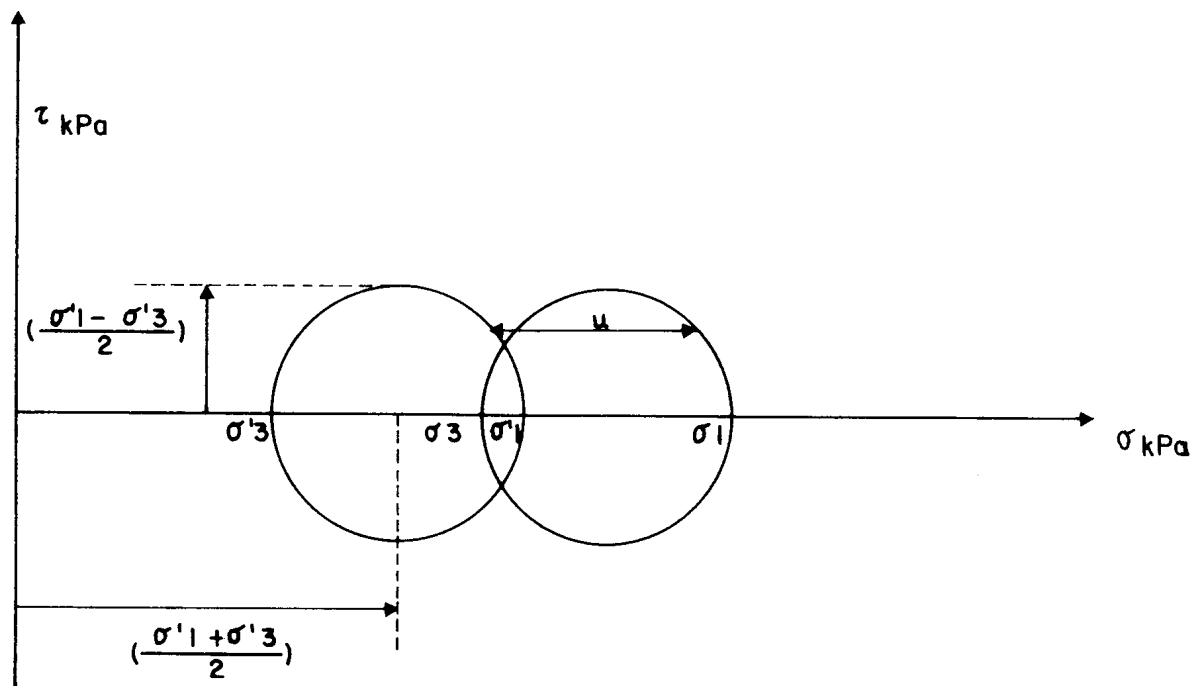


Fig. 4 – Círculos de Möhr en tensiones totales y efectivas

TRABAJO Nº LOCALIZACIÓN MUESTRA Nº

Tipo de ensayo

Tipo de muestra: Inalterada
Remoldeada

Probeta Nº	I	II	III	IV
Presión externa, σ_3 (kPa)				
Referencia célula				
Referencia aparato presión externa				
Referencia aparato cambio volumen				
Volumen del molde, V en cm^3				
Densidad buscada, ρ (g/cm^3)				
Humedad inicial del suelo, w_o (%)				
Muestra utilizada, $m_h = V \cdot \rho \cdot \frac{(100 + w_o)}{100}$ (g)				
Humedad deseada, w_d (%)				
Agua añadida, a $\frac{100 (w_d - w_o)}{100 + w_o} \times m_h$ (g)				
Masa inicial de la probeta, m_o (g)				
Masa al final del ensayo, m_f (g)				
Masa seca probeta, m_d (g)				
Agua inicial, $a_1 = m_o - m_d$ (g)				
Agua final, $a_2 = m_f - m_d$ (g)				
Humedad inicial, $w_i = (a_1/m_d) \times 100$ (%)				
Humedad final, $w_f = (a_2/m_d) \times 100$ (%)				
Diámetro inicial medio, d_i (mm)				
Sección inicial, A_o (mm^2)				
Altura inicial media, L_o (mm)				
Volumen inicial, $V_o = A_o \times L_o \times 10^{-3}$ (cm^3)				
Densidad seca, $\rho_d = m_d/V_o$ (g/cm^3 o Mg/m^3)				

Observaciones:

Fig. 5 – Modelo de impreso para expresión de los datos de las probetas

TRABAJO N°

LOCALIZACIÓN

MUESTRA N°

Tipo de ensayo

Tipo de muestra: Inalterada
Remoldeada

Drenos laterales: SI/NO

Procedimiento de saturación: Por incremento de la presión externa y de la contrapresión
A humedad constante

Probeta N°: Presión externa, σ_3 (kPa):

Presión externa kPa		Contra- presión kPa	Presión intersticial kPa		Coeficiente, B $B = \delta_u / \delta \sigma_3$		Cambio de volumen cm ³		
σ_3	$\delta \sigma_3$		u	δ_u			Antes V ₁	Después V ₂	Dife- rencia
Observaciones:							Volumen total de agua absorbido por la probeta cm ³		

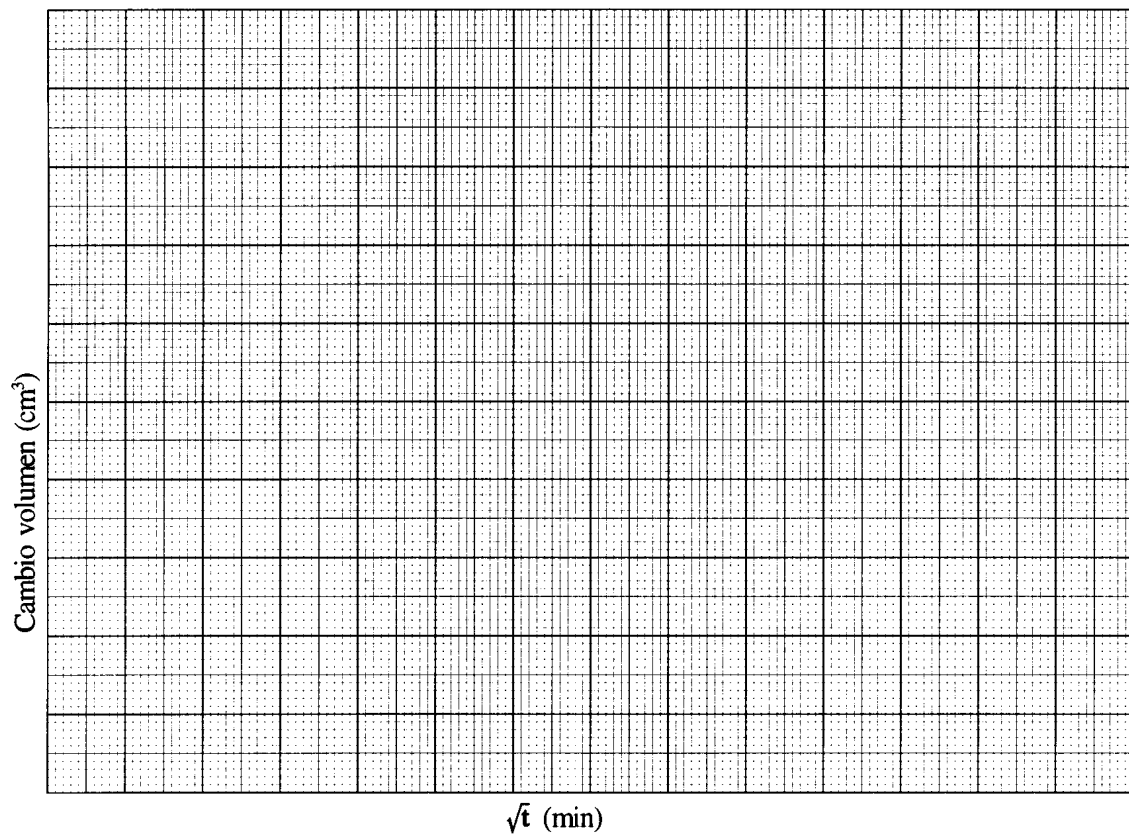
Fig. 6 – Modelo de impreso para expresión de los datos de saturación

MUESTRA N°

Volumen inicial, V_0 (cm³):

[illegible]

Fig. 7 – Modelo de impreso para expresión de los datos de consolidación



Volumen probeta consolidada, $V_c = V_o - \Delta V_c$ (cm³)=

Deformación volumétrica, $\varepsilon_v = \Delta V_c / V_o$:

Longitud probeta consolidada, $L_c = L_o (1 - \frac{1}{3} \varepsilon_v)$ (mm):

Área probeta consolidada, $A_c = A_o (1 - \frac{2}{3} \varepsilon_v)$ (mm²):

Del gráfico, $\sqrt{t_{100}} =$ t_{100} (min)=

Tiempo rotura, t_f (min) =

Deformación estimada rotura, ε_f (%) =

Velocidad de rotura, V (mm/min) =

Fig. 8 – Modelo de impreso para expresión de resultado en la determinación de la velocidad de rotura

LOCALIZACIÓN:

Velocidad deformación (%/h):

Área probeta consolidada, A_c (mm²) =

Presión lateral efectiva deseada, σ'_3 (kPa) =

Drenes laterales: SI/NO

TRABAJO N°:

MUESTRA N°:

LOCALIZACIÓN:

Presión célula, σ_3 (kPa):

Velocidad prensa, V (mm/min):

Velocidad deformación (%/h):

Longitud probeta consolidada, L_c (mm) =

Área probeta consolidada, A_c (mm²) =

Volumen probeta consolidada, V_c /cm³) =

Presión lateral efectiva deseada, σ'_3 (kPa) =

Espesor membrana (mm) =

Drenes laterales: SI/NO

Datos de rotura

Fecha	Hora	Deformación axial			Área A_s (mm ²)	Fuerza axial				Tensión desviadora			Tensiones principales			Trayectoria de tensiones	
		Lectura	ΔL (mm)	ϵ		Lectura R	Diferencia $R-R_e$	C_t (N/div)	P (N)	$(\sigma_1-\sigma_3)_m$ (kPa)	$\sigma_{mb} + \sigma_{dr}$ (kPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	σ_1 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	S' (kPa)	t' (kPa)
			0	0			0		0			0					0

Fig. 11 – Modelo de impreso para expresión de resultados del ensayo triaxial a compresión no consolidado, con rotura rápida y sin drenaje

Nº TRABAJO		DENOMINACIÓN		Nº MUESTRA	
PROBETA Nº					
kPa					

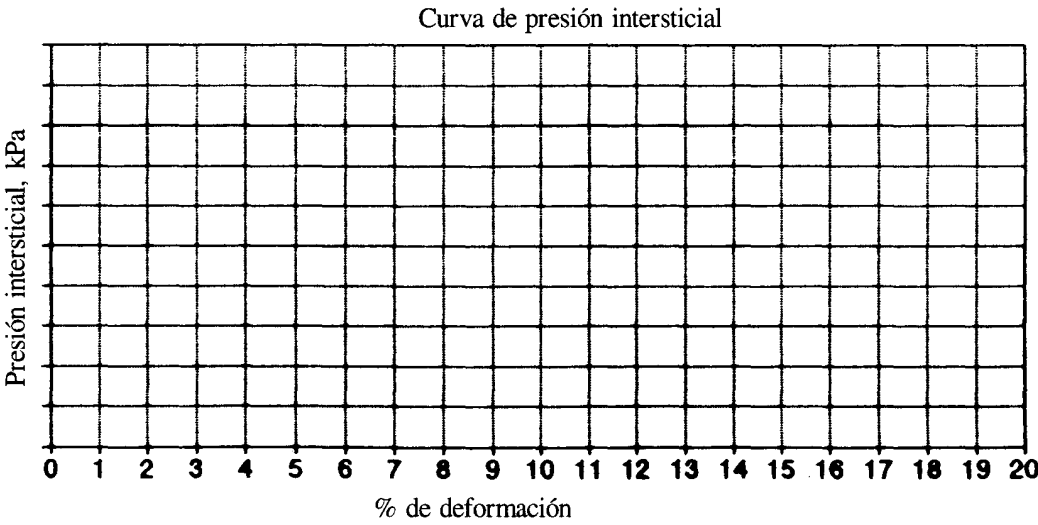
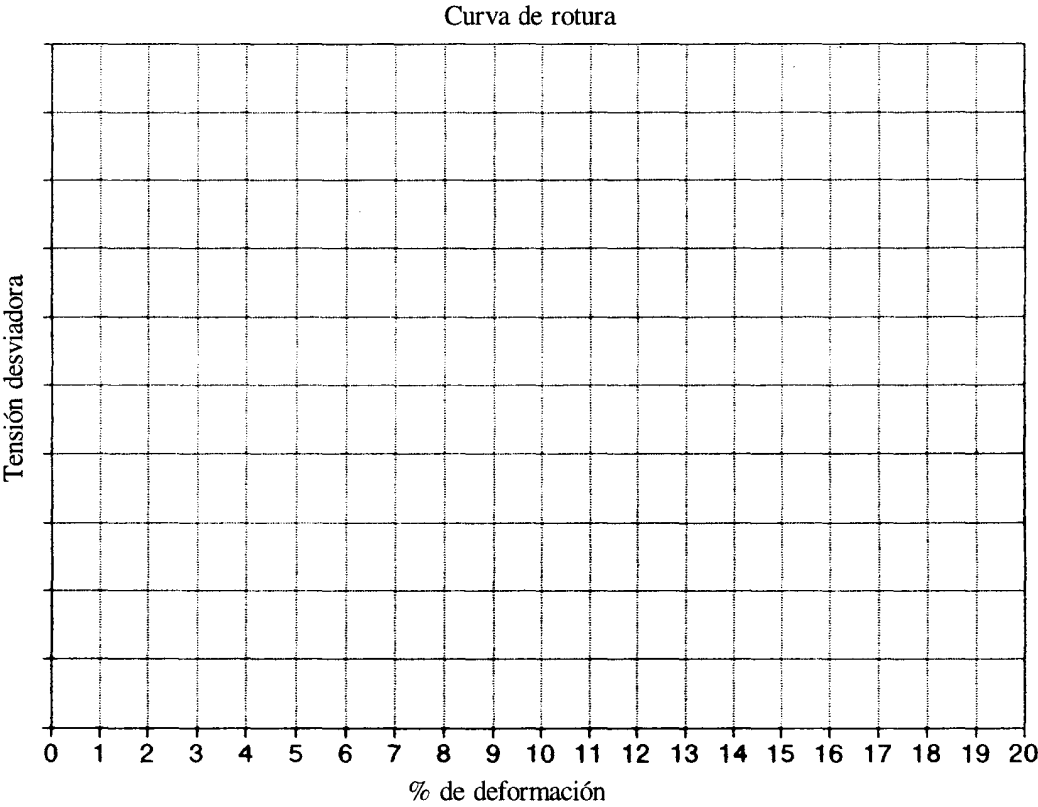
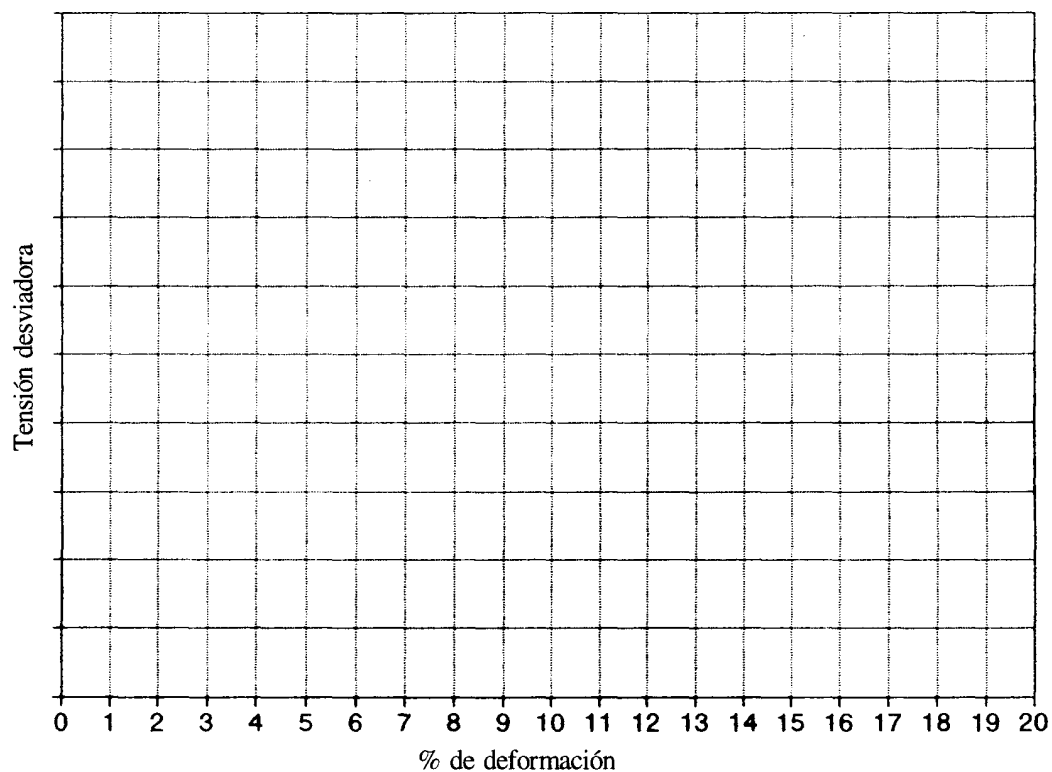


Fig. 12 – Modelo de impreso para la representación de las curvas de rotura y de presiones instersticiales

Nº TRABAJO	DENOMINACIÓN	Nº MUESTRA
------------	--------------	------------

PROBETA Nº					
kPa					

Curva de rotura



Curva de cambio de volumen

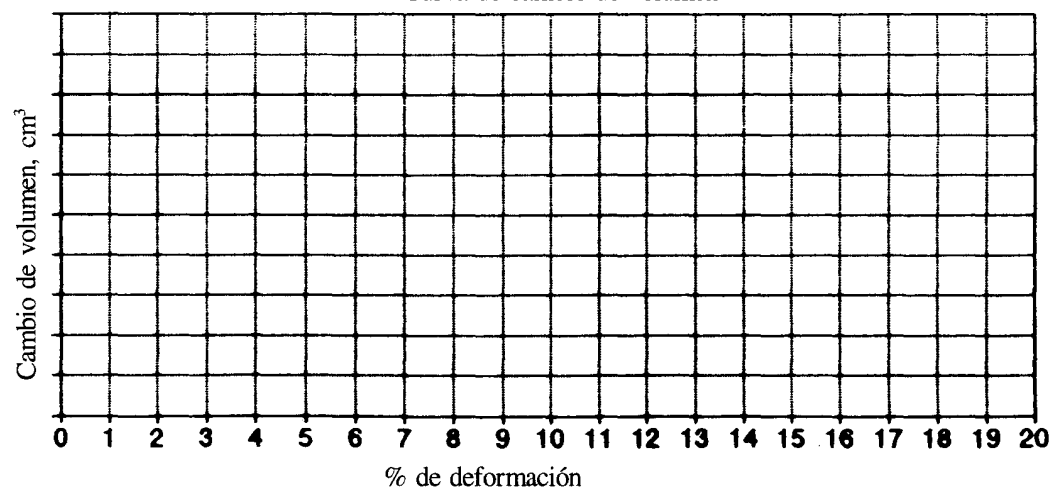


Fig. 13 – Modelo de impreso para la representación de las curvas de rotura y de cambio de volumen

Nº TRABAJO:

DENOMINACIÓN:

Nº MUESTRA:

Probeta Nº	I	II	III	IV	V
P. externa					
% Humedad inicial					
% Humedad final					
Densidad seca					
% Def. a la rotura					
V. Ensayo 1% def.					

Observaciones:

.....

.....

Tipo de muestra Diam.

Tipo de ensayo

.....

----- Presiones totales

—— Presiones efectivas

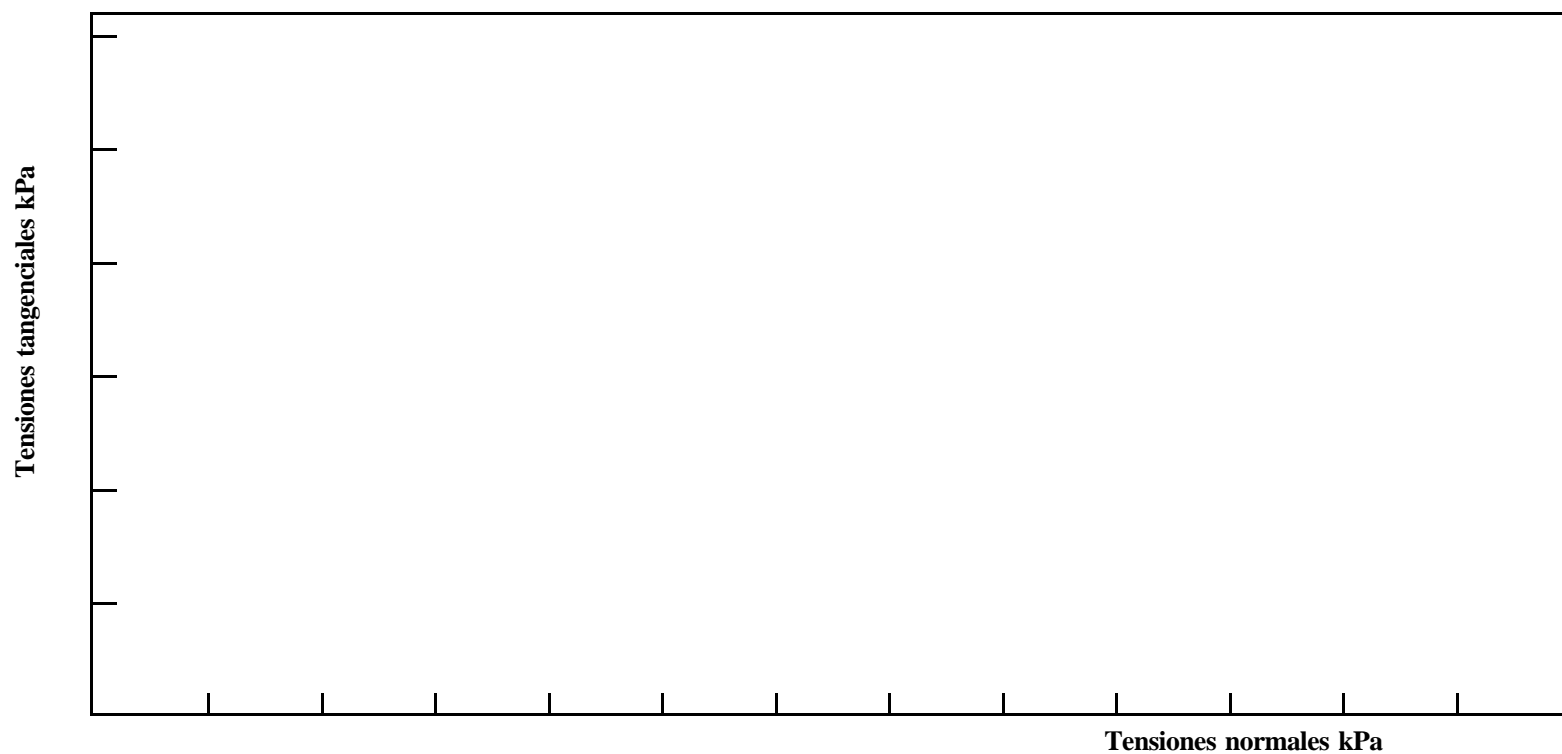


Fig. 14 – Modelo de impreso para la representación de los círculos de Möhr

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID