

**NORMA
ESPAÑOLA**
Propiedades mecánicas de las rocas

ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
RESISTENCIA. PARTE 4: RESISTENCIA A
LA COMPRESIÓN TRIAXIAL

UNE
22-950-92
Parte 4

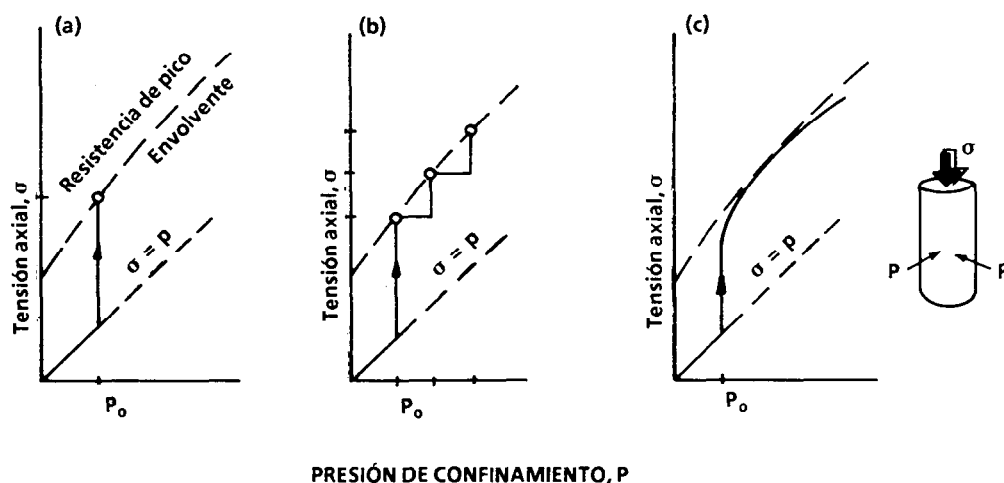
1 OBJETO

Se describen tres tipos diferentes de ensayo de compresión triaxial. El objeto de estos ensayos es medir la resistencia de probetas cilíndricas de roca en función de la presión de confinamiento.

2 CAMPO DE APLICACIÓN

Los tres tipos de ensayo difieren unos de otros en la forma en que se genera la envolvente de resistencia, figuras 1a, 1b, 1c. Con el ensayo tipo I, "Ensayo individual", se obtienen puntos individuales de la envolvente de la resistencia de pico, figura 1a, mientras que con el ensayo tipo II, "Ensayo de Estado de Rotura Múltiple", figura 1b, y con el ensayo tipo III, "Ensayo de Estado de Rotura Continua", figura 1c, la envolvente se genera con un sólo ensayo utilizando un procedimiento por escalones o continuo.

NOTA – Si se sospecha que existe una influencia de las presiones de poro se recomienda realizar diversos ensayos con diferentes contenidos de humedad y si de éstos se deducen efectos evidentes de la presión de poro, se recomienda realizar las modificaciones apropiadas en el procedimiento de ensayo.



- (a) Ensayo individual, tipo I.
(b) Ensayo de estado de rotura múltiple, tipo II.
(c) Ensayo de estado de rotura continua, tipo III.

Fig. 1 – Ensayos de compresión triaxial

Continúa en páginas 2 a 10

Secretaría del
CTN
AITEMIN

Las observaciones relativas a la presente norma deben ser dirigidas a
AENOR - Fernández de la Hoz, 52 - 28010 Madrid

UNE 22-950-92 /4

© AENOR 1992

Depósito legal: M 22 382-92

Mechanical properties of rocks. Strength determination tests. Part 4:
Triaxial compression strength.

Propriétés mécaniques des roches. Essais pour la détermination de la
résistance. Part 4: Résistance à la compression triaxial.

Grupo 5

La información obtenida de una sola probeta va aumentando desde el ensayo tipo I al ensayo tipo III. Los requerimientos del equipo de ensayo son mayores para los ensayos tipos II y III que para el ensayo tipo I.

Los procedimientos de ensayo no prevén medidas de la presión de poro o de drenaje de la probeta.

3 NORMAS PARA CONSULTA

UNE 7-281 – *Verificación de la escala de cargas de las máquinas de ensayo a tracción.*

UNE 22-950 /3 – *Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 3. Determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson.*

4 DEFINICIÓN

4.1 compresión triaxial: Es la compresión producida por la aplicación de tensión normal en tres direcciones perpendiculares.

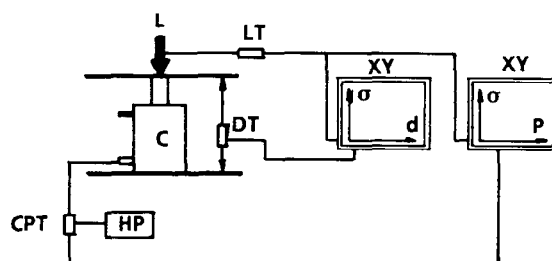
5 SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- b_i es la ordenada en el origen;
- c_i es la cohesión aparente;
- D es el diámetro de la probeta;
- m_i es la pendiente de la recta;
- P es la presión de confinamiento;
- ψ_i es el ángulo de rozamiento interno;
- σ es la tensión axial.

6 MÉTODO DE ENSAYO

6.1 Aparatos

6.1.1 Equipo general de ensayo. El equipo de ensayo es, salvo pequeñas excepciones mencionadas específicamente, el mismo para los tres tipos de ensayo y debe estar constituido por los elementos que se indican en la figura 2.



- L = Carga axial
- LT = Transductor de carga
- C = Célula triaxial
- DT = Transductor de deformación (opcional en el ensayo tipo I)
- CPT = Transductor de la presión de confinamiento
- HP = Aparato para aplicar la presión de confinamiento
- XY = Registrador X-Y (opcional en el ensayo tipo I)

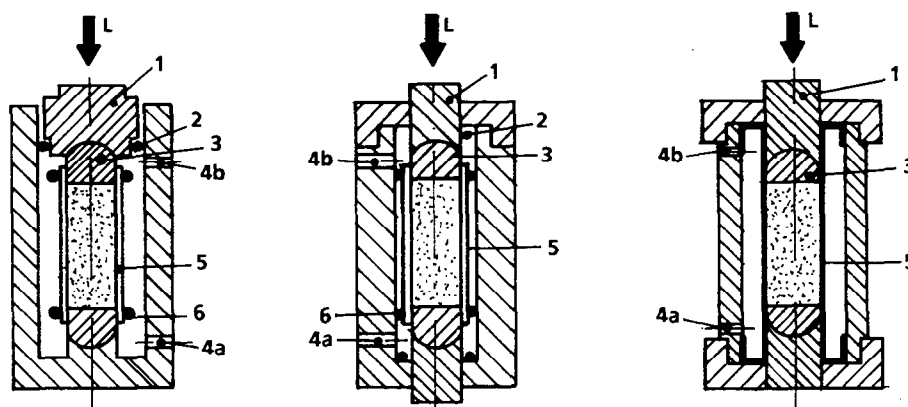
Fig. 2 – Esquema del equipo de ensayo

6.1.2 Aparato para aplicación y control de la carga axial. Se utilizará una prensa rígida para aplicar y medir la carga axial en el testigo de roca. Toda prensa cuya rigidez sea inferior a 0,1 MN/mm se considera flexible y no se puede utilizar para la realización de este ensayo. Es conveniente la utilización de una prensa servo-controlada.

Se utilizarán las máquinas adecuadas para aplicar y medir las cargas axial y diametral. Deberán ser de suficiente capacidad y podrán aplicar las cargas a la velocidad que se especifica en el apartado 6.3.1. Esto se verifica a intervalos de tiempo adecuados y debe cumplir con la norma UNE 7-281.

6.1.3 Cámara triaxial. Comprende las siguientes partes, que se indican en la figura 3.

- a) Una cámara triaxial para aplicar la presión de confinamiento a la probeta, de diseño análogo a una de las tres alternativas señaladas en la figura 3.
- b) Dos placas de acero, con una dureza mínima de 58 Rockwell C, y colocadas en los extremos de la probeta. El diámetro de las placas estará comprendido entre D y 1,02 D, donde D es el diámetro de la probeta. El espesor de las placas debe ser como mínimo de D/3. Las superficies de las placas estarán rectificadas y pulidas y su error de planitud debe ser menor de $\pm 0,005$ mm. A intervalos de tiempo adecuados se verificará esta planitud.



- L = carga aplicada en el aparato
 1 = pistón de carga
 2 = cierres
 3 = placas de carga
 4a = conexión hidráulica
 4b = orificio para purgas
 5 = membrana flexible
 6 = abrazaderas

Fig. 3 – Cámara triaxial

- c) Asientos esféricos. Las placas en contacto con las superficies superior e inferior de la muestra deben incorporar un asiento esférico. Los asientos esféricos de las placas deben estar lubricados con aceite mineral. El centro de curvatura de los asientos esféricos debe coincidir con el centro de la cara de la probeta.
- d) Una membrana flexible, de material adecuado, que debe utilizarse para evitar que el fluido de confinamiento penetre en la probeta. La membrana no debe penetrar apreciablemente en los poros de la superficie y será de longitud suficiente como para poder extenderse bien sobre las placas. Cuando se extienda ligeramente, debe tener el mismo diámetro que la probeta.

NOTA – Se recomienda utilizar membranas de goma de neopreno de 1,5 mm de espesor de pared y una dureza Shore-A entre 40 y 70.

6.1.4 Aparatos para aplicar la presión de confinamiento. Debe utilizarse una bomba hidráulica o algún otro sistema de suficiente capacidad y que proporcione una regulación precisa de la presión dentro de un intervalo de $\pm 1\%$.

6.1.5 Equipos de medición y registro de cargas, presiones y desplazamientos. Para este equipo deben hacerse las siguientes consideraciones:

- a) Se utilizarán aparatos indicadores de la presión, tales como células o captadores de presión (manómetros), para medir la presión de confinamiento. La precisión de los aparatos estará de acuerdo con 6.3.1 a). Es conveniente utilizar al menos dos indicadores con escalas de 0 a 15 y de 0 a 70 MPa, respectivamente.

Para el ensayo tipo I es necesario mantener constante la presión de confinamiento y no es preciso registrarla continuamente. Para los ensayos tipo II y III es necesario un registro continuo de la presión de confinamiento, por lo que se emplearán captadores para la medida de la presión.

- b) Debe utilizarse un captador de desplazamiento para medir y registrar desplazamientos axiales de la probeta. Esto permite medir y registrar de forma continua los desplazamientos axiales, lo cual es necesario para los ensayos tipo II y tipo III y es opcional para el ensayo tipo I.

NOTA – Las deformaciones axiales o diametrales de la probeta podrán medirse mediante bandas extensométricas de acuerdo con el apartado 6.1.4 de la norma UNE 22-950 /3.

- c) La carga axial, el desplazamiento axial y la presión de confinamiento pueden leerse intermitentemente o registrarse continuamente. En este último caso, se utilizarán registradores XY o un equipo análogo de tiempo real. En los ensayos tipo II y tipo III es necesario un registro continuo y el control de todos los datos.

6.2 Preparación y conservación de las muestras para ensayo, y de las probetas

6.2.1 Dimensiones de las probetas. Las probetas de ensayo deben ser cilíndricas con una relación altura/diámetro de 2,5 a 3,0. El diámetro deberá ser 10 veces superior al tamaño de grano mayor de la roca y no inferior a 50,0 mm.

Se medirán los diámetros en ángulo recto en la parte superior, en la parte media y en la parte inferior de la probeta, y se calcula el diámetro medio con una precisión de 0,1 mm. El diámetro medio se utiliza para calcular la superficie de la sección transversal. La altura de la muestra se determinará con 1,00 mm de precisión.

6.2.2 Tratamiento y acabado de las probetas. Para alcanzar las formas citadas en el apartado 6.2.1 hay que elaborar las probetas mediante perforación, corte, torneado y pulido o cualquier otro método apropiado. Hay que procurar que el medio de refrigeración y circulación afecte lo menos posible a las propiedades del material.

La superficie lateral de la probeta debe ser lisa y estar libre de irregularidades. Las bases deben ser planas y formar un ángulo recto con el eje de la probeta de ensayo.

Se refleja en el cuadro nº 1 la tolerancia en la elaboración de probetas de roca para el ensayo de determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson.

Se debe evitar el empleo de materiales de recubrimiento como igualadores para conseguir el paralelismo requerido de las superficies de las bases de la probeta de ensayo. Si fuera necesario desviarse de esta regla, debido a las características propias del material a ensayar, habrá que indicarlo en el protocolo del ensayo.

Tabla 1
Tolerancia en la elaboración de probetas de rocas para el ensayo de determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson

	Rocas de poca deformabilidad ej.: cuarcita, granito, etc.	Rocas de deformabilidad media ej.: arenisca, caliza, etc.	Rocas de deformabilidad alta ej.: lutita, margas, etc.
Desviación de la generatriz respecto a la dirección axial	+ 0,3 mm	+ 0,4 mm	+ 0,5 mm
Tolerancia de planitud de la base	+ 0,02 mm	+ 0,05 mm	+ 0,1 mm
Desviación en la perpendicularidad entre la base y el eje longitudinal de la probeta	+ 10'	+ 20'	+ 30'

6.2.3 Humedad. Siempre que sea posible, las condiciones de humedad "in situ" deben preservarse hasta el momento del ensayo, ya que la humedad tiene un efecto significativo sobre la deformabilidad de la probeta.

6.3 Procedimiento operatorio

6.3.1 Procedimiento tipo I o ensayo individual. Para realizar el ensayo triaxial individual o ensayo tipo I, deben cumplirse las condiciones siguientes:

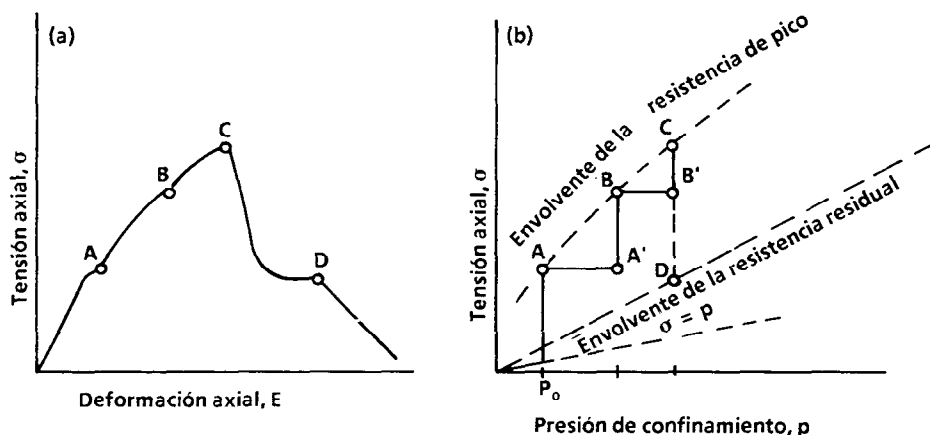
- La carga axial y la presión de confinamiento, deben aumentarse de forma simultánea, hasta que se alcance el nivel predeterminado de presión de confinamiento. Una vez alcanzada la presión de confinamiento debe mantenerse dentro de un intervalo del $\pm 2\%$ de su valor. El procedimiento para aumentar la presión de confinamiento desde cero al nivel requerido, depende del equipo de ensayo, pero la presión de confinamiento y la carga axial se aumentarán de tal forma que la tensión axial en la probeta siempre sea superior a la presión de confinamiento, pero la diferencia entre los mismos no debe ser superior a la décima parte de la resistencia a compresión uniaxial, hasta haber alcanzado el valor prescrito de la presión de confinamiento.

La carga axial sobre la probeta debe ser la correspondiente a una velocidad de deformación constante, de forma que la rotura se produzca entre los 5 y 15 min desde el comienzo de aplicación de la carga. Alternativamente, la velocidad de carga debe estar comprendida dentro de los límites de 0,5 a 1,0 MPa/s.

- Se registrará la carga axial máxima sobre la probeta y la correspondiente presión de confinamiento.

6.3.2 Procedimiento tipo II o ensayo de rotura múltiple. Para realizar el ensayo triaxial de rotura múltiple o ensayo tipo II deben realizarse las operaciones que se indican a continuación:

- Aplicación de la presión inicial de confinamiento. La carga axial y la presión de confinamiento se aumentarán de manera simultánea, hasta que ésta alcance el valor de la presión de confinamiento inicial (véase apartado 6.3.1).
- Aumento de la carga axial manteniendo la presión de confinamiento inicial dentro de un intervalo del $\pm 2\%$ de su valor, hasta que se observe la resistencia de pico correspondiente a la curva tensión axial-deformación axial, que es el punto A de la figura 4 a.



(a) Curva tensión axial-deformación axial.
(b) Curva tensión axial-presión de confinamiento.

Fig. 4 – Ensayo triaxial de estado de rotura múltiple

Es posible registrar y trazar cargas axiales en función de desplazamientos axiales o bien, trazar directamente tensión axial en función de deformación axial, o cualquier otra combinación.

La carga axial se aumentará de manera continua, con una velocidad de deformación constante dentro del intervalo de 10^{-2} s^{-1} a 10^{-5} s^{-1} , de manera que el punto A sea alcanzado al cabo de 5 a 15 min como mínimo desde el comienzo de aplicación de la carga.

- c) Aumento manual de la presión de confinamiento en un escalón, es decir, entre los puntos A y A' de la figura 4b, y a continuación aumento de la carga axial, utilizando el procedimiento mencionado en b) de este mismo apartado.

En los casos en que se ensayen materiales muy frágiles o con una prensa cuya rigidez sea relativamente baja, puede producirse rotura explosiva al alcanzar la resistencia de pico.

- d) Se continúa con el procedimiento por escalones hasta llegar al punto C, de la figura 4, elegido previamente. La presión de confinamiento debe mantenerse constante mientras que continúa la aplicación de la carga axial. Esto hace que se produzca la rotura con lo que la tensión axial cae a su valor residual, que es el punto D de la figura 4.
- e) La presión de confinamiento debe ir reduciéndose de una manera continua hasta descargar completamente la probeta. La curva de tensión axial en función de la presión de confinamiento debe seguir la envolvente de resistencia residual, o resistencia posterior a la rotura.

6.3.3 Procedimiento tipo III o ensayo de rotura continua. Para realizar el ensayo triaxial de rotura continua o ensayo tipo III, se realizarán las operaciones que se indican a continuación:

- a) Aplicación de la presión inicial de confinamiento. La carga axial y la presión de confinamiento deben aumentarse de forma simultánea hasta que ésta alcance el valor de la presión de confinamiento inicial (véase apartado 6.3.1).
- b) Aumento de la carga axial manteniendo la presión de confinamiento inicial dentro de un intervalo del $\pm 2\%$ de su valor, hasta que se observe la correspondiente resistencia de pico, que es el punto A de la curva tensión axial-deformación axial, de la figura 5 (véase apartado 6.3.1).

La carga axial sobre la probeta debe aumentarse de forma continua, con una velocidad de deformación constante dentro del intervalo de 10^{-2} s^{-1} a 10^{-5} s^{-1} , de manera que el punto A de la figura 5 sea alcanzado al cabo de 5 a 15 min como mínimo desde el comienzo de aplicación de la carga.

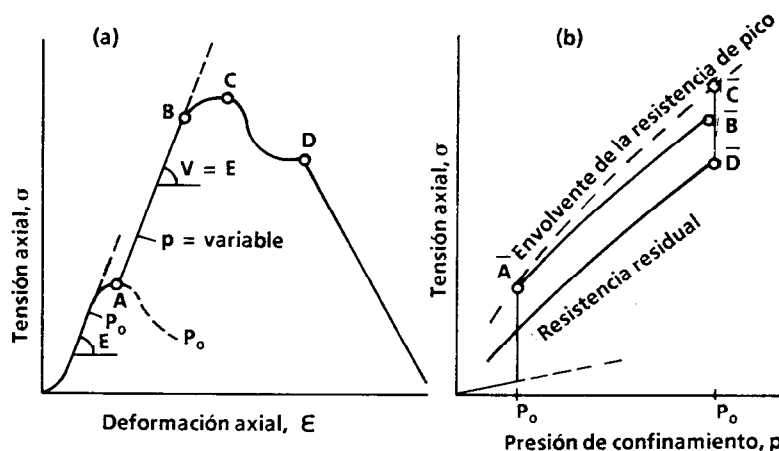


Fig. 5 – Ensayo triaxial de estado de rotura continua

- c) Trazar una línea recta AB, figura 5a, paralela a la parte lineal de la curva inicial carga axial-deformación, desde el punto A.

La pendiente de dicha línea recta es la pendiente de la parte lineal inicial de la curva carga axial-deformación.

- d) Mientras que la carga axial aumenta según la velocidad seleccionada, la presión de confinamiento se aumentará de forma simultánea, de tal manera que el registro en tiempo real siga la línea AB de la figura 5a. La carga axial variable y la presión de confinamiento deben registrarse de forma continua.
- e) En el punto B, de la figura 5a, elegido previamente, la presión de confinamiento debe mantenerse dentro de un intervalo del 2% de su valor, mientras se continúe aplicando la carga axial. Como resultado de esto, se produce una desviación de la línea recta AB, alcanzándose la rotura en el punto C de la figura 5a. Cuando se continúe comprimiendo la probeta, la presión axial caerá a su valor residual, punto D de la figura 5a.

La presión de confinamiento debe reducirse de forma continua hasta descargar completamente la probeta, según se muestra en la figura 5. La curva de la tensión axial en función de la presión de confinamiento seguirá una envolvente de tensión residual.

6.3.4 Número de probetas. El número de probetas será el suficiente para definir en el intervalo de presiones de confinamiento requeridas, de manera adecuada, la envolvente de resistencia. El número de probetas necesario para este fin depende del método de ensayo elegido (tipos I, II ó III), de la variabilidad intrínseca de la roca y de la aplicación que se vaya a hacer de los datos. El número mínimo de probetas a ensayar debe ser 5 en los ensayos tipo I y tipo II y 3 en el ensayo tipo III.

6.4 Obtención y expresión de los resultados

6.4.1 Cálculo de la tensión axial. La tensión axial se calculará dividiendo la carga axial aplicada a la probeta durante el ensayo por el área de la sección transversal original, calculada según se especifica en el apartado 6.2.1.

6.4.2 Envolventes de resistencia de pico y envolventes de resistencia residual. En el ensayo tipo III, deben generarse directamente las envolventes de resistencia de pico y de resistencia residual. En los ensayos tipo I y tipo II se pueden obtener envolventes análogas, completando las curvas a través de los puntos representativos de datos individuales (veánse las figuras 1a y 1b).

En caso de que sea necesario, las envolventes de resistencia de pico y residual pueden aproximarse matemáticamente mediante expresiones lineales o bilineales, según la expresión:

$$\sigma = m_i P + b_i$$

donde

σ es la tensión axial;

P es la presión de confinamiento;

m_i es la pendiente de la recta;

b_i es la ordenada en el origen.

La posición de las líneas rectas se fijará mediante la ordenada b_i , la pendiente m_i y el intervalo de presión de confinamiento aplicado, según se muestra en la figura 6. Utilizando los parámetros m y b , el ángulo de rozamiento interno y el valor de la cohesión "aparente", según la teoría de Coulomb, pueden calcularse a través de las siguientes expresiones:

$$\varphi_i = \arcsen \frac{m_i - 1}{m_i + 1}$$

$$c_i = b_i \frac{1 - \sen \varphi_i}{2 \cos \varphi_i}$$

donde

φ_i es el ángulo de rozamiento interno;

m_i es la pendiente de la recta;

b_i es la ordenada en el origen;

c_i es la cohesión aparente.

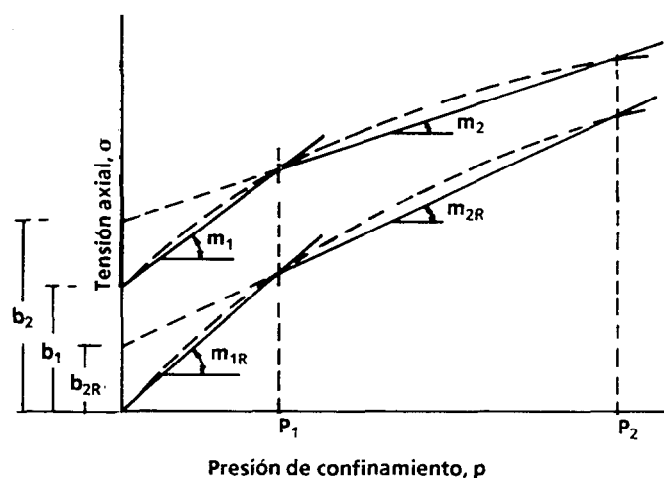


Fig. 6 – Envolventes de la resistencia de pico y de la resistencia residual y sus aproximaciones mediante dos tramos rectos

Parámetros m_i , b_i , m_{iR} , b_{iR} que definen las resistencias mediante un tramo recto.

6.5 Informe de resultados

El informe debe incluir, al menos, la siguiente información:

- a)* Descripción litológica de la roca.
- b)** Orientación del eje de carga con respecto a la anisotropía de la probeta; por ejemplo, planos de estratificación, foliación, etc.
- c)* Origen de la muestra, incluyendo:
 - Localización geográfica.
 - Profundidad y orientaciones.
 - Fechas y método de muestreo.
 - Historia de almacenamiento y entorno.
- d)** Número de probetas ensayadas.
- e)** Diámetro y altura de la probeta, en mm.
- f)* Contenido de agua y grado de saturación en el momento de recepción de la muestra y de realización del ensayo.
- g)* Fecha de ensayo y tipo de máquina de ensayo.
- h)** Forma de rotura (por ejemplo, cizallamiento, fracturación axial, etc.) (Foto o croquis).
- i)* Cualquier otra observación o dato físico disponible, tales como peso específico, porosidad y permeabilidad, citando el método de determinación de cada una.
- j)** Valores de la carga aplicada, tensión y deformación, como resultados tabulados o registrados sobre un gráfico.
- k)** Duración del ensayo y/o velocidades de desplazamiento y tensión.
- l)** Las curvas del ensayo, según se especifica en los apartados 6.3.1, 6.3.2 y 6.3.3. Para los ensayos individuales o ensayos tipo I, también debe proporcionarse una tabla que identifique las probetas y en la que conste la presión de confinamiento y la resistencia axial de cada probeta.
- m)* Pueden indicarse los valores calculados de la cohesión aparente y del ángulo de fricción, para la resistencia de pico y residual respectivamente, junto con el intervalo de presiones de confinamiento en las que son válidos.

* Opcional

** Obligatorio